GABLER EDITION WISSENSCHAFT

Sabine Kujath

Stauplanung für Containerschiffe

Entwicklung eines objektorientierten Systems

DUV Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH

Kujath
Stauplanung für Containerschiffe

GABLER EDITION WISSENSCHAFT

Sabine Kujath

Stauplanung für Containerschiffe

Entwicklung eines objektorientierten Systems

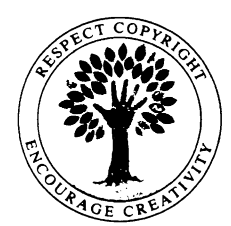
Mit einem Geleitwort
von Prof. Dr. Uwe Pape

Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH

Die Deutsche Bibliothek - CIP-Einheitsaufnahme

Kujath, Sabine:
Stauplanung für Containerschiffe : Entwicklung eines objektorientierten Systems / Sabine Kujath.
Mit einem Geleitw. von Uwe Pape.
(Gabler Edition Wissenschaft)
ISBN 978-3-8244-6565-1 ISBN 978-3-663-08972-8 (eBook)
DOI 10.1007/978-3-663-08972-8

Lektorat: Ute Wrasmann / Brigitte Knöringer



http://www.gabler-online.de

Höchste inhaltliche und technische Qualität unserer Produkte ist unser Ziel. Bei der Produktion und Auslieferung unserer Bücher wollen wir die Umwelt schonen: Dieses Buch ist auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier gedruckt.

ISBN 978-3-8244-6565-1

Geleitwort

Der weltweite Warenverkehr weist ununterbrochen starke jährliche Wachstumsraten auf. Mit der Einführung des Containers hat sich der internationale Warenaustausch verändert. Der Verkehr zwischen den Kontinenten wird seitdem verstärkt mit Containerschiffen durchgeführt.

Diese Entwicklung hat zum Einsatz immer größerer Schiffe mit Kapazitäten bis zu 6000 Container-Einheiten geführt. Im Rahmen ihrer Rundreise ohne fest definierten Ausgangs- und Zielhafen werden verschiedene Häfen angelaufen, in denen Container geladen und/oder gelöscht werden. Die Zuordnung der Container zu Stellplätzen auf einem Schiff wird Stauplanung genannt.

Die Lösung dieses Planungsproblems stellt aus mathematischer Sicht eine anspruchsvolle Tätigkeit dar, die aber in den Gesamtkontext des Containerverkehrs eingebettet ist. Die Ergebnisse der Stauplanung beeinflussen maßgeblich die Abfertigungszeit der Containerschiffe an den Terminals.

Die Stauplanung ist bisher unter verschiedenen Blickwinkeln betrachtet worden, die beispielsweise die Stabilität eines Containerschiffes in den Vordergrund stellen. Die vorliegende Arbeit stellt einen ganzheitlichen, objektorientierten Ansatz zur Stauplanung dar, der neben technischen Aspekten auch wirtschaftliche Gesichtspunkte mit einbezieht.

Die Rahmenbedingungen der praktischen Realisierung sind ebenfalls berücksichtigt worden. Dies konnte durch eine Zusammenarbeit mit der Hamburger Hafen- und Lagerhaus AG (HHLA) und Hapag-Lloyd AG gewährleistet werden. Beiden Unternehmen gilt daher der Dank für die gute Zusammenarbeit.

Uwe Pape

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand als Diplomarbeit am Fachbereich Wirtschaftsinformatik bei Prof. Dr. U. Pape mit Zweitkorrektur durch Prof. Dr. R. Möhring vom Fachbereich Mathematik, Arbeitsgruppe Diskrete Mathematik, für deren Unterstützung ich mich hiermit bedanken möchte.

Mein besonderer Dank gilt Dipl.-Ing. Dieter Pumpe, dessen Betreuung eine große Hilfe war, sowie unter anderen Herrn Dübler und Herrn Steenken von der Hamburger Hafen- und Lagerhaus AG und Herrn Grommé als Mitarbeiter der Hapag-Lloyd AG für die Möglichkeit, mich vorort über die Stauplanung in der Praxis zu informieren sowie für die Überlassung von Informationsmaterial und für die Bereitstellung von Geldmitteln als Druckkostenzuschuß für diese Veröffentlichung.

Desweiteren bedanke ich mich bei Manuela Koehler, Susanne Bischoff, Astrid Wiedemann, Ina Zimmermann und meinem Mann Volker für die Korrektur meiner Arbeit sowie für vielfältige Tips und Anregungen.

Sabine Kujath

Inhalt

Abbildungsverzeichnis

Tabellenverzeichnis

1 Einleitung

Seit der Einführung der Transporteinheit Container hat sich der Transport von Gütern zwischen Auftraggebern und Empfängern grundlegend verändert. Eine internationale Transportkette besteht aus den Landtransporten vom Auftraggeber zu einem Hafen U und von einem Hafen Z zum Empfänger sowie aus dem Seetransport mit Containerschiffen zwischen den Häfen U und Z. Insbesondere die Planungsaufgaben des Seetransportes sind durch ein deutlich gestiegenes Transportvolumen und die damit einhergehende Entwicklung immer größerer Containerschiffe wesentlich komplexer geworden.

Eine Planungsaufgabe des Seetransportes ist die Zuordnung von Containern zu Stellplätzen eines Containerschiffes. Dieses Problem bezeichnet man als Stauplanung. In der Praxis wird die Stauplanung manuell mit Unterstützung durch Bildschirmübersichten durchgeführt, da die bislang entwickelten theoretischen Verfahren durch Nichtbeachtung wichtiger Einflußfaktoren nur eine geringe Praxisrelevanz aufweisen. Insbesondere Gefahrgut- und Thermal-Container bleiben durch diese Verfahren unberücksichtigt.

Ein weiterer Nachteil der theoretischen Verfahren ist die fehlende Einbeziehung verwandter mathematischer Optimierungsprobleme. Ohne eine Berücksichtigung von bekannten mathematischen Verfahren ist eine Aussage über die Lösbarkeit der Stauplanungsprobleme „Grobplanung“ und „Feinplanung“ jedoch nicht möglich. Daher ist die Entwicklung und Analyse je eines Grob- und eines Feinplanungsmodells auf Grundlage von mathematischen Optimierungsproblemen ein zentraler Aspekt der vorliegenden Arbeit.

In Kapitel 2 werden zunächst der Aufbau von Containerschiffen, die Statikeigenschaften der Schiffe im Betrieb sowie die benötigten Grundlagen der Beschaffenheit und Bezeichnung von Containern vorgestellt. Darauf aufbauend folgt die Beschreibung der von den Eigenschaften der Container und Schiffe abhängigen Stauvorschriften. Weitere Grundlagen sind Informationen über von Containerschiffen gefahrene Routen und Beschreibungen der Terminals, in denen die Be- und Entladung der Schiffe erfolgt.

Die Untersuchung der Stauplanungsziele in Kapitel 3, inklusive einer Analyse der auftretenden Interdependenzen, ermöglicht die Aufstellung einer Zielhierarchie. Diese wird durch die,

in Kapitel 4 dargestellten, Vorgehensweisen in der Praxis bestätigt. Die Stauplanung ist dabei in die Grobplanung und die Feinplanung unterteilt. Zusätzlich wird in Kapitel 4 je ein realisiertes Stauplanungssystem aus den Bereichen Reederei, Terminal und Schiff vorgestellt.

Kapitel 5 enthält den Entwurf mathematischer Modelle für die Grob- und Feinplanung. Zuerst werden mehrere notwendige Prämissen erläutert und die benötigten Variablen und Mengen definiert. Als Vorbereitung der Modelle folgen Analysen von Containermengen und Umstauern sowie die Verfahren zur Berechnung der relevanten Containergewichte der Schiffsstatik. Die Modelle enthalten je eine Problemformulierung, mehrere einzuhaltende Bedingungen und eine bzw. mehrere Zielfunktionen. Zusätzlich benötigt die Grobplanung eine Kostenfunktion für die Bewertung von Kombinationen der Container-Stellplatz-Zuordnungen.

Die Modellanalyse in Kapitel 6 beginnt mit der Verifizierung zweier, in der Modellentwicklung aufgestellter, Behauptungen und einer kurzen Einführung in die Komplexitätstheorie von Algorithmen. Als Vorbereitung der Klassifikation des Grob- und Feinplanungsproblems folgt unter Berücksichtigung verwandter kombinatorischer Optimierungsprobleme, die Betrachtung von linearen und quadratischen Assignmentproblemen sowie von multikriteriellen Entscheidungsproblemen. Eine Lösungsstrategie, mit deren Hilfe für die Grobplanung eine Zuordnung von Containern zu Stellplätzen gefunden wird, und ein Vergleich mit einem bereits entwickelten theoretischen Grobplanungsansatz schließen die Modellanalyse ab.

Die Umsetzung der Lösungsstrategie in ein Anwendungsprogramm ist in den Kapiteln 7 Datenbank, 8 Implementierung und 9 Benutzeroberfläche dokumentiert. Die mit MS Access 2.0 entwickelte Datenbank wird ausgehend von einem Entity-Relationship-Modell dargestellt. Für die Implementierung wurde aufgrund der Kompatibilität zu der Datenbank MS Access die Programmiersprache MS Visual C++ gewählt. Ergebnis der objektorientierten Implementierung ist das unter MS Windows lauffähige Programm, welches die benötigten Daten aus der Datenbank einliest und für mehrere Häfen je einen Stauplan erstellt. Kapitel 10 enthält schließlich eine Auswertung der Ergebnisse des Programmes.

2 Grundlagen

In diesem Kapitel werden die für die Stauplanung wichtigen Begriffe, wie z.B. Standard-Container, Vollcontainerschiff, Containerbrücke, Range usw. eingeführt und erläutert. Die benötigten Definitionen sind in Container-, Schiff-, Stauplanungs-, Routen- und Terminal-Begriffe unterteilt.

2.1 Container

Ein Container ist ein „Transportbehälter, der
a) von dauerhafter Beschaffenheit und daher genügend widerstandsfähig für den wiederholten Gebrauch ist,
b) besonders dafür gebaut ist, den Transport von Gütern mit einem oder mehreren Transportmitteln ohne Umpacken der Ladung zu ermöglichen,
c) für den mechanischen Umschlag geeignet ist,
d) so gebaut ist, daß er leicht be- und entladen werden kann,
e) einen Rauminhalt von mindestens $1 m^3$ ($35,3 ft^3$) hat.
Fahrzeuge und Verpackungen fallen nicht unter den Begriff Container".[1]

Für die Stauplanung wichtige Merkmale sind die Größe, das Gewicht und der Typ sowie Angaben über Ursprungs- und Zielhafen sowie Informationen zur Ladung, insbesondere beim Transport von Gefahrgut und Waren, bei denen vorgegebene Temperaturen eingehalten werden müssen. Hierauf wird in den folgenden Abschnitten näher eingegangen.

Unabhängig von obengenannten Merkmalen besitzt jeder Container, der im Überseeverkehr zum Transport verwendet wird, eine eindeutige Containernummer, die sich aus der Reedereikennung und einer siebenstelligen Zahl zusammensetzt (Beispiel für einen Hapag Lloyd Container: HLCU 2637002).

---

[1] DIN ISO 668, 1988, S. 3

2.1.1 Größen

Klassifiziert werden die Container nach den Nennmaßen in Fuß (ft), „[...] diese Maße ergeben sich unter Außerachtlassung der Toleranzen und nach Rundung auf die nächste geeignete ganze Zahl durch welche ein Container bestimmt werden kann. Die Nennmaße werden üblicherweise in Inch-Einheiten angegeben.“[2]

Die DIN ISO 668 enthält neben der Begriffsdefinition und Klassifikation von Containern außerdem die Festlegung der Maße (Außenmaße, Innenmaße und Türöffnung), Grenzabweichungen und Gesamtgewichten. In Tabelle 1 sind die für die Stauplanung wichtigen Merkmale der Norm zusammengefaßt.

Die heute im Überseeverkehr am häufigsten benutzten Container sind die der Klassen 1AA und 1CC, im folgenden nach der Nennlänge als 40er bzw. 20er Container bezeichnet. Die früher häufig eingesetzten Container der Klassen 1A und 1C werden dagegen heute nur noch selten benutzt. Container der Klassen 1BB und 1B mit einer Nennlänge von 30 ft werden gelegentlich in den USA zum Transport eingesetzt, sind aber international nur von geringer Bedeutung, da die Containerschiffe in der Regel auf den Transport von 40er und 20er Container eingerichtet sind.

Neben den genormten Containergrößen kommen viele weitere Größen vor; hierbei sind besonders die *High-Cube-Container* zu erwähnen. Mit einer Länge von 40 ft und einer Höhe von 9 ft 6 in = 2895 mm werden sie „[s]peziell für leichte, voluminöse Ladung und überhohe Ladung bis max. 2,70 m“[3] eingesetzt. Alle übrigen Container, die in Länge, Breite oder Höhe von der Norm abweichen, werden nachfolgend *Übergrößen-Container* genannt. Deutlich niedriger als das maximale Gesamtgewicht ist das durchschnittliche Bruttogewicht, welches laut Angaben der HHLA für 20er Container 10 t und für 40er Container 15 t entgegen zulässigen 24t bzw. 30,48t beträgt.

---

[2] DIN ISO 668, 1988, S. 4

[3] Hapag-Lloyd89 S. 14

Container-bezeichnung	Nennlänge in Fuß (ft)	Länge	Breite	Höhe	max. Gesamt-gewicht
1AA	40	12192 mm = 40 ft	2438 mm = 8ft	2591 mm = 8ft 6 in	30480 kg
1A				2438 mm = 8ft	
1AX				< 2438 mm = < 8ft	
1BB	30	9125 mm = 29 ft 11,25 in	2438 mm = 8ft	2591 mm = 8ft 6 in	25400 kg
1B				2438 mm = 8ft	
1BX				< 2438 mm = < 8ft	
1CC	20	6058 mm = 19 ft 10,5 in	2438 mm = 8ft	2591 mm = 8ft 6 in	24000 kg
1C				2438 mm = 8ft	
1CX				< 2438 mm = < 8ft	
1D	10	2991 mm = 9 ft 9,75 in	2438 mm = 8ft	2438 mm = 8ft	10160 kg
1DX				< 2438 mm = < 8ft	

Tabelle 1: Containermerkmale nach DIN ISO 668

2.1.2 Typen

Außer nach der Größe lassen sich Container auch nach der Bauart unterscheiden. Neben *Standard-Containern*, die den Normmaßen der DIN ISO 668 entsprechen, nur vorne und hinten durch Türen zu öffnen sind und nicht über zusätzliche Komponenten wie z.B. einem Kühlaggregat oder Ventilationsschlitzen verfügen, nennt Hapag Lloyd[4] zehn weitere Container Typen, die in Tabelle 2 zusammengefaßt und im folgenden beschrieben werden:

Hardtop-Container kommen nur als 20er Container vor, sie haben ein festes Stahldach, welches zur Beladung von oben und für den Transport von überhoher Ladung entfernt werden kann. Wird das Dach beim Transport wieder geschlossen, können sie genau wie Standard-Container behandelt werden. Für offene Container gibt es besonders in Verbindung mit Gefahrgut einige Sondervorschriften, auf die später eingegangen wird.

Open-Top-Container kommen als 40er sowie als 20er Container vor, sie können wie die Hardtop-Container von oben beladen werden, sind aber nicht durch ein festes Dach, sondern nur mit einer Plane wetterdicht zu verschließen. Sie werden daher ständig wie offene Container behandelt.

20er oder 40er *Flats* sind speziell für Schwergut und überbreite Ladung geeignet, da sie oben offen sind und die Seiten herausgenommen werden können. Dies ermöglicht auch nicht containerisierbare Ladung, d.h. Ladung, die aufgrund ihrer Größe nicht in einen Container gestaut werden kann, auf mehreren nebeneinandergestellten Flats zu verladen.

Zusätzlich sind für überlange Ladung 20er oder 40er *Plattformen* einsetzbar. Plattformen bestehen nur aus einem Boden auf dem Stückgüter verzurrt - d.h. mit Gurten befestigt - werden können. Auch hier besteht für nicht containerisierbare Ladung die Möglichkeit, mehrere Plattformen zusammenzustellen.

Ventilierte Container besitzen in den Dach- und Bodenlängsträgern Öffnungen zur Belüftung. Für solche Container gibt es auf manchen Schiffen spezielle Laderäume mit Ventilations-

[4] vgl. Hapag-Lloyd89, S. 2

anlagen. Enthalten sie eine Ladung, die nicht belüftet werden muß, können sie genau wie Standard-Container behandelt werden.

Bezeichnung	Nenngrößen	Behandlung wie Standard-Container möglich?
Standard-Container	20 ft und 40 ft	ja
High-Cube-Container	40 ft	nein, wegen Überhöhe
Hardtop-Container	20 ft	nur wenn geschlossen
Open-Top-Container	20 ft und 40 ft	nein, weil offen
Flat	20 ft und 40 ft	nur wenn geschlossen
Plattform	20 ft und 40 ft	nein, weil ohne Seiten und offen
Ventilierter Container	20 ft	ja, wenn Ladung keine Belüftung erfordert
Isolier-Container	20 ft und 40 ft	nein, wegen Übergröße und benötigtem Stromanschluß
Thermal-Container	20 ft und 40 ft	nein, da Stromanschluß benötigt
Bulk-Container	20 ft	ja
Tank-Container	20 ft	ja

Tabelle 2: Container-Typen

Thermal-Container (häufig als Reefer- oder Kühlcontainer bezeichnet) und *Isolier-Container* sind „[...] speziell für Ladung, die konstant gehaltene Plus- oder Minustemperaturen erfordert [...]“[5], geeignet. Dafür ist bei Thermal-Containern ein Stromaggregat in den Container eingebaut, während Isolier-Container durch die Schiffs- bzw. Terminal-Stromanlage oder ein *Clip-On-Aggregat* (externes Stromaggregat) versorgt werden. Beide Typen benötigen auf dem Schiff Stromanschlüsse, die nur an wenigen Plätzen vorhanden sind. Isolier-Container, die genau wie die Thermal-Container als 20er oder 40er vorkommen, werden durch das Clip-On-Aggregat zu Übergrößen-Containern, was bei der Stauplanung gesondert berücksichtigt werden muß.

---

[5] Hapag-Lloyd89, S. 34

Speziell für Schüttgut sind *Bulk-Container* im Dach mit drei runden Einfüllöffnungen und an den Türen mit zwei Entleerungsöffnungen ausgestattet. Diese nur als 20er gebauten Container können aber genauso wie Standard-Container behandelt werden. Für flüssige Chemikalien oder Lebensmittel werden *Tank-Container* eingesetzt. Hierbei ist ein Tankzylinder von einem ebenen Boden und festen Seitenstreben eingefaßt, was insgesamt dem Format eines 20er Containers entspricht (siehe Abbildung 1). Dies ermöglicht es, Tank-Container genau wie Standard-Container zu behandeln.

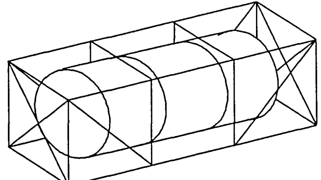


Abb. 1: Tank-Container

2.1.3 Weitere Begriffe

Mit *Ursprungshafen* wird der Hafen bezeichnet, in dem ein Container auf ein Schiff verladen - mit anderen Worten *verstaut* - wird. *Zielhafen* ist der Hafen, für den ein Container bestimmt ist und in dem er *gelöscht* - Fachausdruck für entladen - wird. Als Umstauer wird ein Container dann bezeichnet, wenn er häufiger als zweimal bewegt werden muß, d.h. wenn zusätzlich zum Verstauen im Ursprungshafen und Löschen im Zielhafen der Container von seinem Platz im Schiff entfernt werden muß. Dies kann z.B. aufgrund von Fehlern bei der Stauplanerstellung, durch defekte Container oder auf Wunsch des Kundens geschehen.

In Literatur und Praxis wird mit der Einheit *TEU* (Twenty Foot Equivalent Unit) gearbeitet. „Ein TEU ist eine Einheit, die einem standardisierten 20' langen Container entspricht (' =1 Fuß = 0,3048 Meter).“[6] Also entspricht ein 20er Container 1 TEU und ein 40er Container 2 TEU.

Weitere wichtige Begriffe, die sich auf den Ort oder die Zeit beziehen und für jeden möglichen Containertyp anwendbar sind, sind Options-Container, Change-of-Destination und Late-Arrivals. *Options-Container* haben zum Zeitpunkt ihrer Verstauung keinen festen Zielhafen,

[6] Schott89, S. 1

es ist nur eine Gruppe von möglichen Zielhäfen bekannt, und der Auftraggeber des Transportes wird später festlegen, in welchem Hafen der Container entladen werden soll. In der Planung wird der letzte mögliche Hafen als Zielhafen angenommen. *Change-of-Destination* bezeichnet einen Container, dessen Zielhafen sich während der Reise ändert. Demnach wird auch ein Options-Container, der vor dem letztmöglichen Zielhafen entladen werden soll, zum Change-of-Destination. Häufig werden durch Change-of-Destination Umstauer verursacht, insbesondere wenn sich der Zielhafen nur für wenige Container einer zusammen verstauten Gruppe ändert. *Late-Arrivals* sind Container, die relativ spät im Ursprungshafen eintreffen. Spät kann hierbei bedeuten, daß mit der Stauplanung bereits begonnen wurde, daß sie abgeschlossen wurde, daß mit dem Beladen des Schiffes schon begonnen wurde oder ein beliebiger anderer Zeitpunkt während der Betreuung eines Schiffes. Diese Container können nicht auf die Plätze verladen werden, welche für sie vorgesehen waren, sondern müssen auf verbliebene freie Plätze gestaut werden. Also können auch hierdurch Umstauer entstehen.

Gelegentlich werden auch Leer-Container, d.h. Container ohne Inhalt, transportiert. Dies ist nötig, um bei ungleichem Verhältnis zwischen zu löschenden und zu ladenden Containern in einem Hafen einen Ausgleich zu schaffen, der verhindert, daß in manchen Häfen Container unbenutzt herumstehen, während sie in anderen Häfen benötigt werden.

Eine weitere sehr wichtige Containerart sind *Gefahrgut-Container*. Jeder Containertyp, vom Standard-Container bis zum Tank-Container, kann ein Gefahrgut beinhalten. Da die Beschreibung der Trennungsvorschriften von Gefahrgütern Angaben zum Schiffsaufbau erfordern, wird dieser Teilbereich später in dem gesonderten Gliederungspunkt 2.3.3 Gefahrgut beschrieben.

Die HHLA benutzt zusätzlich zu den üblichen Containertypen intern die Bezeichnung Cool-Container für Behälter mit Waren, die nicht auf einem beheizten Container stehen sollten, da letztere, je nach Heiztemperatur, auch Wärme nach außen abgeben. So sollte beispielsweise leicht verderbliche Waren nicht über einem beheizten Container stehen.

2.2 Containerschiffe

Container können mit vielen unterschiedlichen Transportmitteln bewegt werden, z.B. durch Lkws, mit der Bahn oder per Schiff. Beim Transport mit Schiffen haben die Vollcontainerschiffe die größte Bedeutung, da sie „[...] konstruktiv speziell für den Transport von Containern ausgelegt sind und ausschließlich diese befördern [...]“[7]. Zusätzlich wird zwischen Feederschiffen und Containerschiffen unterschieden. Während Feederschiffe als Zubringer nur verhältnismäßig wenige Container über kurze Wege, z.B. innerhalb Europas, transportieren, werden Containerschiffe auf weltweiten Routen eingesetzt. Dadurch ermöglichen Feederschiffe den Häfen, die nicht durch Containerschiffe angelaufen werden können, am Überseeverkehr teilzunehmen.[8]

Durch Umstellen von Frachtschiffen, die viele verschiedene Arten von Stückgütern und unterschiedlich große Kisten transportieren können, auf Containerschiffe hat sich der Seetransport grundlegend verändert. „Das Containerschiff entstand in den USA Ende der fünfziger Jahre, als ein Speditionsunternehmen daran ging, die Aufliegergehäuse von Sattelschleppern ohne Fahrgestell über größere Seestrecken per Schiff zu befördern. Zehn Jahre später begann dann die Umstellung der wichtigsten Linienverkehrsrouten auf den Containerverkehr.“[9] Insbesondere konnte die Effektivität des Seetransportes auf diese Weise deutlich gesteigert werden. „Als Faustregel gilt, daß beim konventionellen Frachter das Verhältnis von Fahr- zu Löschzeit 1:1 ist, beim Containerschiff beträgt dieses Verhältnis 4:1!“[10]

Containerschiffe lassen sich in Panamax-Schiffe und Post-Panamax-Schiffe unterteilen. Während die Panamax-Schiffe die Schleuse des Panamakanals passieren können und somit auf sämtlichen Routen einsetzbar sind, ist dies - aufgrund größerer Abmessungen - den Post-Panamax-Schiffen nicht möglich.[11] Panamax-Containerschiffe werden, abhängig von ihrer Kapazität, in fünf Generationen eingeteilt. Einen Überblick zeigt Tabelle 3.

---

[7] Schott89, S. 13

[8] vgl. Kienzle91, S. 58

[9] Alte/Matthiessen80, S. 9

[10] Kienzle91, S. 52

[11] vgl. Schott89, S. 14

Die maximale Stellplatzkapazität der zur Zeit bei Hapag Lloyd eingesetzten Containerschiffe schwankt zwischen 2181 TEU auf der „Humboldt Express“ vom Baujahr 1984 (einem Schiff der 3. Generation) und 4422 TEU z.B. auf der „Hoechst Express“ vom Baujahr 1991 der 5. Generation. Anhang 15.1 enthält einen Überblick über die Seitenansicht, die Ansicht von oben und den Querschnitt der „Hoechst Express“.

Typ	Länge [m]	Breite [m]	Tiefgang [m]	Kapazität [TEU]
1. Generation	ca. 180	ca. 25	ca. 9	ca. 730
2. Generation	ca. 230	ca. 30	ca. 11	ca. 1300
3. Generation	ca. 275	ca. 32	12	ca. 1800
4. Generation	ca. 287	ca. 32	12	ca. 3000
5. Generation	ca. 294	ca. 32	12	ca. 4400
PANAMAX	300	32	12	

Tabelle 3: Generationen von Panamax-Containerschiffen[12]

2.2.1 Aufbau

Sämtliche folgenden Angaben zum Aufbau von Containerschiffen basieren auf den Aussagen und dem Informationsmaterial der Mitarbeiter Herrn Dübler und Herrn Roth der Hamburger Hafen- und Lagerhaus- Aktiengesellschaft (HHLA) und Herrn Grommé der Reederei Hapag Lloyd (Oktober/November 1995).

Ein Containerschiff beinhaltet mehrere Laderäume, die durch feuer- und flüssigkeitsdichte Laderaumwände, sogenannte Schotte, begrenzt sind. Die Laderäume werden in mehrere Bays, spezieller Ausdruck für Abteilungen, unterteilt, welche durch Führungsschienen, den sogenannten Cell Guides, 40er oder 20er Container aufnehmen können. In jeder Bay können in Querrichtung mehrere Container in Stacks, spezielle Bezeichnung für Stapel, übereinander gestellt werden. Auf älteren Schiffen teilen zusätzlich Schotte die Bays in zwei bis drei Luken, um die Stabilität zu erhöhen. Auf diese Unterteilung wird auf den neuen Schiffen verzichtet, um problemlos Schwergüter mit extremen Überlängen transportieren zu können.

[12] vgl. Schott89, S. 14 (Einteilung in 3 Generationen), vgl. auch Kienzle91, S. 53 (Einteilung in 5 Generationen)

Die meisten Containerschiffe sind durch Lukendeckel in die Staubereiche *An Deck* und *Unter Deck* unterteilt; es gibt jedoch auch Schiffe ohne Lukendeckel, bei denen nur der Bereich Unter Deck betrachtet wird. Lukendeckeln sind in Anlehnung an die frühere Einteilung in Luken meistens dreigeteilt. Die Anzahl der aufnehmbaren Container ist durch die Schiffsabmessungen, die maximal zulässigen Belastungen, insbesondere auf Lukendeckeln pro Bay, und den freizuhaltenden Sichtstrahl begrenzt. Der Sichtstrahl bezieht sich auf den Blick von der Kommandobrücke auf das Fahrwasser und darf nicht durch Container verstellt werden. An Deck können auf den Lukendeckeln Container in bis zu sechs Lagen in maximal dreizehn Stacks nebeneinander gestaut werden. Die meisten Container nur auf einem Deckel. Einige - die Anzahl hängt vom Schiffstyp ab - können auch auf zwei Deckeln stehen. Unter Deck sind bis zu acht Lagen und maximal elf Stacks vorhanden. Das Verhältnis der Kapazität An Deck zu Unter Deck variiert zwischen 1:2 auf den älteren Schiffstypen und 1:1 auf den Hapag Lloyd Schiffen der 5. Generation. Bays können in fünf verschiedenen Typen unterteilt werden, welche in Tabelle 4 aufgelistet sind.

B40	*40er-Bay*, in die nur 40er Container gestaut werden können.
BS20	*Single-20er-Bay*, in der pro Lage nur ein 20er Container in Längsrichtung Platz hat. Jeder Lukendeckel hat eine Länge von 1 TEU statt 2 TEU normal.
BD20	*Doppel-20er-Bay*, in der pro Lage zwei 20er Container in Längsrichtung nebeneinander gestaut werden können.
B4020	*4020er-Bay*, in der 40er und 20er Container in Querrichtung gemischt nebeneinander gestapelt werden dürfen.
BG4020	*Gemischte-4020er-Bay*, in der 40er und 20er Container auch gemischt übereinander gestapelt werden dürfen. Aber nur 40er auf zwei 20er und nicht umgekehrt (vgl. Abschnitt 2.3 Stauvorschriften).

Tabelle 4: Bay-Typen

Um einen Stellplatz auf dem Schiff genau lokalisieren zu können, werden die Bays, die Stacks und die Tiers, d.h. Stapelplätze je Stack, durchnumeriert. Die Bays erhalten ungerade Nummern für jeden Bereich, in dem 20er Container gestaut werden können, und gerade Nummern für Bereiche, die 40er Container aufnehmen können. Eine B40 bekommt daher eine gerade Nummer, eine BS20 eine ungerade Nummer, eine BD20 zwei ungerade Nummern und B4020

bzw. BG4020 erhalten zwei ungerade und eine gerade Nummer. Die Numerierung beginnt am Bug mit der kleinsten Zahl. Ist eine Bay durch drei Nummern gekennzeichnet, so liegt die gerade Nummer genau zwischen den beiden ungeraden, so gehört beispielsweise Bay 8 zu den Bays 7 und 9 (vgl. Abb. 2).

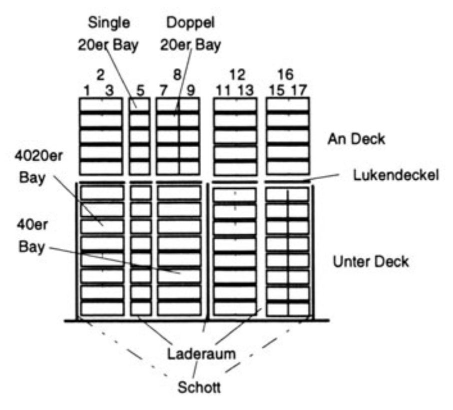


Abb. 2: Laderäume Seitenansicht

Die Stacks werden auf Schiffen mit maximal dreizehn Stacks beginnend mit 0, bei maximal zwölf beginnend mit 1 von der Mitte nach außen abwechselnd rechts und links durchnumeriert (siehe Abb. 3). Bei den Tiers beginnt man mit der Numerierung am Deckel. Unter Deck erhält der erste Tier unter dem Deckel die Nummer 16 und jeder weitere darunterliegende Tier bekommt die folgende gerade Zahl zugewiesen. An Deck erhält der erste Tier über dem Deckel die Nummer 84, alle weiteren Tiers erhalten die folgenden geraden Nummern (vgl. Abb. 3). In Ausnahmefällen, wenn der erste Tier etwas niedriger als normal liegt, wird auch die 82 vergeben.

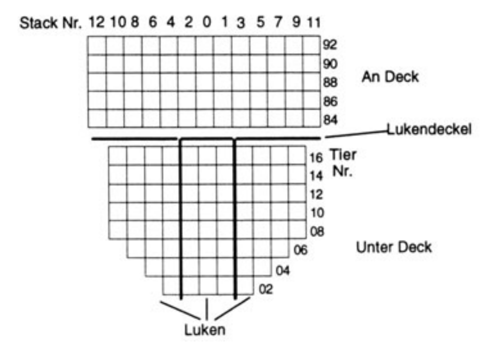


Abb. 3: Querschnitt einer Bay

Einige Stellplätze sind zusätzlich mit Stromanschlüssen ausgestattet, die ein Verstauen von Thermal-Containern ermöglichen. Während auf älteren Schiffen diese Anschlüsse nur in den ersten zwei Lagen An Deck zu finden waren, sind auf den neueren Schiffen auch Unter Deck Stromanschlüsse verfügbar, was eine geringere Einschränkung bei der Platzauswahl für die entsprechenden Container zur Folge hat.

2.2.2 Betriebsstatik

Unter Betriebsstatik versteht man die Berechnungen und Überlegungen, die zur Sicherung von Stabilität, Trimm und Freibord sowie der Festigkeit, unterteilt in Längsfestigkeit und Torsion, eines Schiffes im Betrieb durchgeführt werden.[13]

„Während diese Aufgaben in den vergangenen Jahrzehnten vielfach nach Gefühl und Erfahrung vom Praktiker gelöst wurden, muß heute bereits vor Beginn der Reise, oft sogar vor Beginn der Beladung, die Betriebsstatik des Schiffes rechnerisch für den gesamten Reiseverlauf überprüft werden. Ziel ist die Kontrolle der Einhaltung von bestimmten Mindestwerten der Stabilität, von bestimmten Höchstwerten der Festigkeitsbeanspruchung, von Grenzwerten des Trimms und des gesetzlichen Mindestfreibords. Wenn auch zunehmend die Beladung von Schiffen aus Rationalisierungsgründen landseitig geplant und vorbereitet wird, so trägt doch der Kapitän [...] allein die Verantwortung für die Stabilität und die richtige Beladung eines in See gehenden Schiffes."[14]

Mit Hilfe von Abbildung 4, welche eine dreidimensionale Schiffsansicht zeigt, können in Tabelle 5 die Statikaspekte schon kurz vorgestellt werden, bevor auf die einzelnen Begriffe in den nächsten Abschnitten näher eingegangen wird.

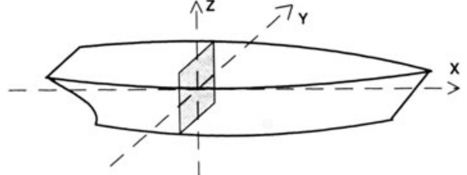


Abb. 4: Achsen der Betriebsstatik[15]

[13] vgl. Schott89, S. 21

[14] Müller/Krauss80, S. 1

[15] vgl. Alte/Matthiessen80, S. 37

Statikbegriff	Wirkung
Stabilität	Drehung um die X-Achse
Trimm	Drehung um die Y-Achse
Freibord	Eintauchtiefe in Richtung der Z-Achse
Torsion	Verwindung um die X-Achse
Längsfestigkeit	Unterschiedliche Belastung entlang der X-Achse in Richtung der Z-Achse

Tabelle 5: Begriffe der Betriebsstatik

2.2.2.1 Stabilität

„Die *Stabilität* eines Schiffes kennzeichnet seine Eigenschaft, in aufrechter Lage zu schwimmen und einer Krängung aufrichtende Momente entgegenzusetzen. Die Stabilität hängt ab von der baulich festgelegten Form und den Hauptabmessungen des Schiffes, aber auch von der betrieblich bedingten Massenverteilung im Schiff (Ladung, Vorräte, Ballast) [...]. Die aufrichtenden Momente eines Schiffes müssen im Betrieb und vor allem während der Seereise allen krängenden Momenten aus Stabilitätsbelastungen (Seegang, Winddruck, Rollbewegungen etc.) gewachsen sein.“[16] *Krängung* bedeutet hierbei Drehung um die horizontale Achse (in Abb. 4 die X-Achse).

Die Stabilität wird in der Literatur nach den Kennwerten *megazentrische Anfangshöhe* und *Hebelarm* bei einem Winkel von 30° bewertet, deren Berechnungen im folgenden Abschnitt kurz dargestellt werden. Abbildung 5 zeigt den Schiffsquerschnitt in aufrechter und gekrängter Lage, dabei haben die Punkte, Strecken und Pfeile folgende Bedeutungen:

G → Gewichtsschwerpunkt
F → Verdrängungsschwerpunkt
FG→ Gewichtskraft
FA→ Auftriebskraft
K → Kielpunkt

M → Anfangsmegazentrum
GM→ megazentrische Anfangshöhe
GZ → Hebelarm
F → Krängungswinkel des Schiffes
w → Pantokaren - Wert

[16] Müller/Krauss80, S. 2/3

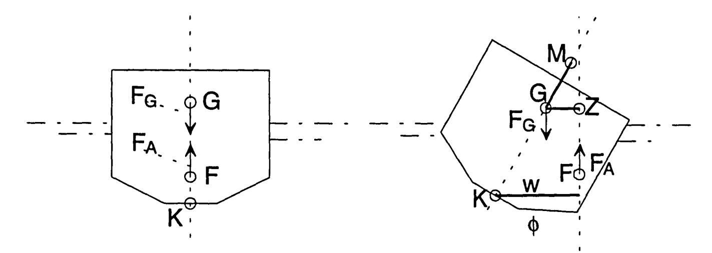


Abb. 5: Stabilität[17]

Der Gewichts- und Verdrängungsschwerpunkt, sowie die Gewichts- und Auftriebskraft sind von der Beladung abhängig, während der Kielpunkt, das Anfangsmegazentrum und der w-Wert aus den Werftunterlagen hervorgehen. Der Krängungswinkel ϕ beeinflußt den Hebelarm.

Die *megazentrische Anfangshöhe* GM ergibt sich aus der Differenz der gegebenen Strecke KM und dem Abstand KG, wobei der Schwerpunktabstand KG durch die Momentenrechnung bestimmt werden kann. KG ist der Quotient aus der Summe der Momente und der Summe der Gewichte; dabei ist die Summe der Momente hier die Summe aller Gewichte des Schiffs multipliziert mit dem jeweiligen Schwerpunktabstand über K. Die Momentenrechnung erfordert also die Erfassung aller Gewichte auf dem Schiff mit ihrer Höhenlage über K.[18] Auf den, für eine genaue Berechnung zusätzlich zu berücksichtigenden, Korrekturfaktor für freie Flüssigkeitsoberflächen in teilgefüllten Tanks soll hier zur Vereinfachung verzichtet werden. Der *Hebelarm* GZ für den jeweiligen Krängungswinkel berechnet sich mittels des aus den Werftunterlagen hervorgehenden w-Wertes, nach der Formel: $GZ = w - KG * \sin \Phi$.
Zur Berechnung der Stabilität ergeben sich somit die Funktionen:

$$KG\,[m] = \frac{\sum (\text{Gewicht [kN]} * \text{Höhe [m]})}{\sum \text{Gewicht [kN]}}$$

$$GM\,[m] = KM\,[m] - KG\,[m]$$

$$GZ\,[m] = w\,[m] - KG\,[m] * \sin \Phi$$

---

[17] vgl. Müller/Krauss80 S. 7, vgl. weiter Schott89, S. 2

[18] vgl. Müller/Krauss80 S. 7, vgl. auch Schott89, S. 26/27

Als Grenzwerte für die megazentrische Anfangshöhe und den Hebelarm bei 30° legt die See-Berufsgenossenschaft für Containerschiffe ab 120 Meter Länge bzw. ab 200 Meter Länge jeweils einen Mindestwert von 0,4 Meter fest. „Die Beurteilung der Stabilität sollte sich jedoch nicht nur auf die Kontrolle der Einhaltung von Mindestforderungen erstrecken. Oft gehen Schiffe mit zu großer Stabilität in See. Die Folgen sind häufigere Resonanzerscheinungen durch Seegangserregung oder sogar Periodengleichheit mit Stampf- und Tauchschwingungen. Dazu kommt, daß steife Schiffe beim Rollen starke Rollbeschleunigungen in den Umkehrpunkten erfahren. Addieren sich zu diesen die Tauchbeschleunigungen in gleicher Richtung, so treten erhebliche Kräfte auf, die zum Übergehen von Ladung und zu Personenunfällen und Schäden im Schiff führen können.“[19] Als steif bezeichnet der Autor Schiffe mit einer megazentrischen Anfangshöhe, die mehr als 1 m beträgt.

Zusammenfassend ergeben sich als Grenzen:

megazentrische Anfangshöhe:	Hebelarm bei einem Krängungswinkel von 30°:
$1\ m > GM \geq 0{,}4\ m$	$GZ\ (\phi = 30°) \geq 0{,}4\ m$

2.2.2.2 Trimm

„Der Trimm eines Schiffes ist die Differenz der Tiefgänge am vorderen und hinteren Lot. Da der Trimm sowohl für das See- und Fahrverhalten, als auch für die Optimierung der Tragfähigkeit bei gegebener Wassertiefe von Bedeutung ist, gibt es Rechenverfahren, mit denen man - ausgehend von einer geplanten Ladungsverteilung - die Tiefgänge und den Trimm vorherbestimmen kann.“[20] Abbildung 6 zeigt das Containerschiff in Längsrichtung in ebener Lage. Die für die Trimmberechnung benötigten Größen haben dabei folgende Bedeutungen:

G → Gewichtsschwerpunkt	P → hinteres Lot
F → Verdrängungsschwerpunkt	h → trimmender Hebel
F_G → Gewichtskraft	TM → Massentrimmoment
F_A → Auftriebskraft	ETM → Einheitstrimmoment

[19] Müller/Krauss80, S. 25

[20] a.a.O., S. 26

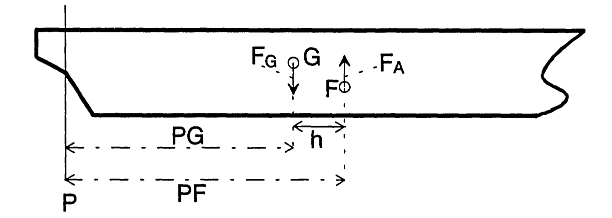


Abb. 6: Trimm[21]

Das hintere Lot P ist der Schnittpunkt der Mitte der Ruderachse mit der Wasserlinie, die der Konstruktion als Schwimmebene zugrunde liegt.[22] P wird von den meisten Werften als Bezugspunkt der Momentenrechnung benutzt, deren Ergebnisse die Verdrängung D und der Abstand des Gewichtsmittelpunktes G vom Bezugspunkt P sind. Mit Hilfe dieser Daten können aus den Werftunterlagen für das jeweilige Schiff u.a. die Lage des Verdrängungsschwerpunktes F in Längsrichtung und das Einheitstrimmmoment ETM entnommen werden. Das ETM ist dabei das auf eine Längeneinheit bezogene Massentrimmoment TM, welches aus dem Produkt der Verdrängung und des trimmenden Hebels berechnet wird. Den trimmenden Hebel h bestimmt man aus der Differenz der Abstände PG und PF.[23] Zusammenfassend ergeben sich folgende Formeln:

$$h\ [m] = PG\ [m] - PF\ [m]$$

$$t\ [m] = \frac{TM\ [kN * m]}{ETM\ [kN]} = \frac{D\ [kN] * h\ [m]}{ETM\ [kN]}$$

Eine Näherung für die Trimmberechnung zur Minimierung des Brennstoffverbrauchs und Stabilitätssicherung, läßt sich mit Hilfe der Faustformel |TR| ≤ Schifflänge / 100 errechnen.

---

21 vgl. Müller/Krauss80, S. 27, vgl. weiter Schott89, S. 31

22 vgl. Müller/Krauss80, S. 61

23 vgl. a.a.O., S. 26/27

2.2.2.3 Freibord

Der *Freibord* ist die maximale Tiefe, die ein Schiff eintauchen darf. Abhängig von der Jahreszeit und dem Seegebiet entspricht er höchstens dem Abstand zwischen der Wasserlinie und dem obersten durchlaufenden Deck bei einem voll beladenen Schiff. Die Freibordmarken auf der Mitte der Steuerbord- und Backbordseite kennzeichnen den Freibord.[24]

Der Kennwert für die Einhaltung des Mindestfreibords ist die Verdrängung, welche in der Literatur mit dem englischen Ausdruck 'Deplacement' bezeichnet wird.[25] Sie wird als Summe aller Teilgewichte des Containerschiffes berechnet, wobei das leere Schiff, die Vorräte, die Besatzung, die Ladung und das Ballastwasser zu berücksichtigen sind. Da das Gewicht des leeren Containerschiffes nicht und das der Vorräte und der Besatzung nur begrenzt variierbar ist, kann die Einhaltung des Freibords nur durch eine Begrenzung des Ladungsgewichtes einschließlich des Ballastwassers gewährleistet werden. Entscheidend ist hierbei aber nicht der mittlere Tiefgang, sondern der Tiefgang des Schiffsbereiches, welcher am tiefsten im Wasser liegt.

$D = \Sigma$ Teilgewichte [kN][26]

2.2.2.4 Torsion

„Unter Torsion des Schiffskörpers versteht man seine Verdrehung oder Verwindung um die Längsachse. Sie wird von Torsionsmomenten hervorgerufen. Den größten Torsionsmomenten ist ein Schiff ausgesetzt, wenn es in schwerem Seegang schräg zur Laufrichtung der Wellen fährt."[27] Massenkräften beim Rollen des Schiffes und ungleichmäßige Beladung erzeugen zusätzliche Torsionsmomente.[28] Durch eine möglichst gleichmäßige Verteilung der Ladung auf dem Containerschiff kann zumindest der zuletzt genannte Grund für das Auftreten von Torsionsmomenten eingeschränkt werden.

---

[24] vgl. Böer84, S. 66/67

[25] vgl. Müller/Krauss80, S. 2

[26] vgl. Müller/Krauss80, S. 2 und vgl. Schott89, S. 23 (beide Quellen verwenden, wie in der Praxis üblich, Masse mit der Einheit Tonne, statt Gewicht mit der Einheit Kilo Newton.

[27] Müller/Krauss80, S. 48

[28] vgl. Müller/Krauss80, S. 48

Für die Berechnung der ladungsbedingten Torsionsmomente teilt man das Schiff in Querrichtung in beliebig viele Bereiche ein. Die Anzahl ist dabei von der gewünschten Genauigkeit der Berechnung abhängig. Als Bereiche bieten sich z.B. Laderäume oder Bays an. Für jeden Bereich berechnet man das Bereichsbreitenmoment, das jeweils die Summe aller Breitenmomente, also die Summe der Produkte aus dem Gewicht eines geladenen Gegenstandes und seines Abstandes von der Mittschiffsebene M ist. Dabei bekommt der Abstand in Backbordrichtung ein positives der in Steuerbordrichtung ein negatives Vorzeichen. Abbildung 7 zeigt ein mit acht Gegenständen beladenes Schiff und deren Abstände von der Mittschiffsebene.

Die verwendeten Symbole haben folgende Bedeutungen:

M - Mittschiffsebene B - Bereichsgrenze

Gx - geladener Container x GxM - Abstand des Containers x von der Mittschiffsebene

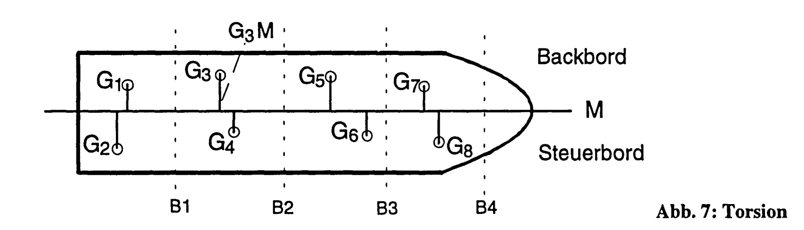


Abb. 7: Torsion

Das Torsionsmoment Tm an einer beliebigen Stelle auf dem Schiff ist gleich der Summe aller links (heckseitig) von dieser Stelle liegenden Breitenmomente Bm. Ergibt die Rechnung für die letzte Bereichsgrenze (in Abb. 7: B4) einen Wert ungleich Null, dann wird von einem Resttorsionsmoment gesprochen. Ein Resttorsionsmoment bedeutet immer gleichzeitig ein krängendes Moment.[29] Zusammenfassend ergeben sich die Funktionen:

$$\text{Bm [m]} = \sum_{\text{Gx liegt im Bereich}} \frac{\text{Gewicht [kN]} * \text{GxM [m]}}{\text{Gewicht [kN]}}$$

$$\text{Tm [m]} = \sum_{\text{Bm liegt links von der gewählten Grenze}} \text{Bm [m]}$$

[29] vgl. Müller/Krauss80, S. 49

2.2.2.5 Längsfestigkeit

„Unter der Längsfestigkeit eines Schiffskörpers versteht man sein Vermögen, den durch ungleichmäßige Gewichts- und Auftriebsverteilung in Schiffslängsrichtung hervorgerufenen Belastungen Widerstandsmomente entgegenzusetzen.“[30]

Querkräfte und Biegemomente sind die Kennwerte für die Längsfestigkeit. Die Querkraft an einer beliebigen Stelle ist dabei gleich der Summe aller vertikalen Kräfte links von dieser Stelle, und das Biegemoment ist gleich der Summe aller vertikalen Momente links von der Stelle. Bei positiven Biegemomentwerten spricht man von ‘Hogging’, dies bedeutet ein Durchbiegen nach oben und bei negativen Werten von ‘Sagging’ (Durchbiegen nach unten).[31] Schiffe mit scharfen Unterwasserformen, insbesondere auch Containerschiffe, sind typische Hoggingschiffe, bei denen in der Regel das Biegemoment in der Mitte des Schiffes kritisch ist.

In der Praxis wird das Schiff zur Berechnung der Längsfestigkeit - in der gleichen Art wie zur Torsionsbestimmung - in Bereiche eingeteilt. Die Querkräfte Q an einer Bereichsgrenze berechnen sich aus der Summe der Belastungen B links der Grenze, dies sind die Gewichtskräfte F_G abzüglich der dazugehörenden Auftriebskräfte F_A. Die Biegemomente M erhält man aus der Summe der Produkte von Belastung B und dem Abstand BX zwischen der Mitte des die Belastung enthaltenden Bereiches und der Bereichsgrenze.[32] Zur Bestimmung der Längsfestigkeit benötigt man also folgende Funktionen:

$$B = \sum (F_G - F_A)$$

$$Qx = \sum_{\text{B links von Grenze X}} B$$

$$BX = \text{Abstand (Mitte des B enthaltenden Bereichs, Grenze X)}$$

$$Mx = \sum_{\text{B links von Grenze X}} (B * BX)$$

[30] Schott89, S. 34

[31] vgl. Müller/Krauss80, S. 43 und Schott89, S. 34

[32] vgl. Schott89, S. 37

2.3 Stauvorschriften

Neben speziellen in den folgenden Abschnitten erläuterten Stauvorschriften für Thermal-, Übergrößen- und Gefahrgut-Containern, sind für alle Container allgemeine Vorschriften einzuhalten.[33] Grundsätzlich ist es erlaubt, gleich große Container aufeinander zu stapeln, also 40er auf 40er und 20er auf 20er Container. Zusätzlich ist es in Bays vom Typ BG4020 erlaubt, einen 40er auf zwei 20er Container zu stapeln. Abbildung 8 faßt die zulässigen Stauvarianten zusammen.

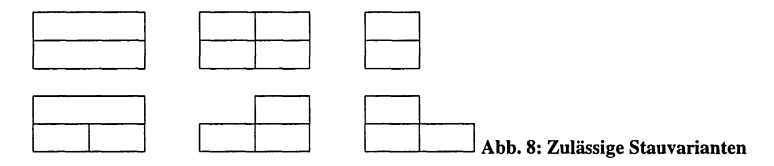


Abb. 8: Zulässige Stauvarianten

Nicht erlaubt ist dagegen, auf einen 40er einen oder zwei 20er Container zu stauen, da die 40er Container in der Mitte keine Verstärkung besitzen und somit der Belastung eventuell nicht standhalten würden. Desweiteren darf aus Stabilitätsgründen unter einem 40er nicht ein einzelner 20er Container stehen. Ausnahmen hiervon bilden einige wenige Plätze, die genau für diese Konstellation vorgesehen und mit Stützen ausgestattet sind. Sämtliche unzulässigen Stauvarianten sind in Abbildung 9 dargestellt.

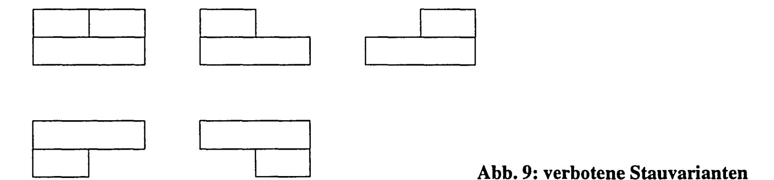


Abb. 9: verbotene Stauvarianten

2.3.1 Thermalgut

Der Begriff Thermalgut faßt solche Waren zusammen, die entweder gekühlt oder beheizt in Thermal-Containern transportiert werden. Solche Container können nur an Plätzen verstaut werden, die mit Stromanschlüssen ausgerüstet sind, welche daher möglichst für Thermal-Container freigehalten werden sollten. Beim Verladen auf das Schiff muß zusätzlich darauf

---

33 vgl. Schott89, S. 84

geachtet werden, die Container so zu plazieren, daß das Aggregat an die Stromversorgung angeschlossen werden kann. Außerdem sollte bei beheizten Containern berücksichtigt werden, daß sich in der Nähe keine Container mit hitzeempfindlichem Inhalt befinden, da Wärme auch nach außen abgegeben wird. Dies können Cool-Container, aber auch Gefahrgut-Container sein.

2.3.2 Übergrößen

Mit dem Begriff *Übergrößen* werden sämtliche Container zusammengefaßt, welche in der Größe von Standard-Containern abweichen. Für diese Größen gibt es gesonderte Stauvorschriften, da die Stellplätze des Schiffes auf den Transport von Containern mit Standard-Größen ausgerichtet sind. Im Stauplan wird die Existenz solcher Container durch Zeichen in die überstehende Richtung gekennzeichnet. Abbildung 10 zeigt die Darstellung von einem Container, der überhoch ist und gleichzeitig rechts und links die benachbarten Stacks überragt.

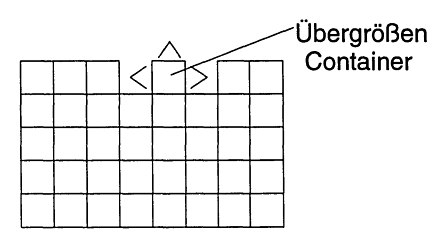


Abb. 10: Darstellung von Übergrößen

Überhohe Container dürfen nur in der obersten Lage Unter Deck oder An Deck gestaut werden. Unter Deck muß zusätzlich sichergestellt sein, daß genügend Platz unter dem Deckel zur Verfügung steht. In Bays des Typs BG4020 dürfen überhohe 20er Container auch An Deck nur in den obersten Tiers stehen, um die horizontale Lage von 40er Containern zu garantieren.

Für überbreite und überlange Container ist es erforderlich in den benachbarten Stacks bzw. Bays direkt neben dem Container, einen Platz freizuhalten. Zusätzlich können auf diese Container und auf die benachbarten freigehaltenen Plätze keine weiteren gestellt werden, da unterschiedlich große Container nur schlecht miteinander zu verzurren sind und die gesamte Fläche jedes Containers eine feste Auflage haben muß. Existieren Unter Deck feste Führungsschienen, so sind diese Übergrößen nur An Deck verstaubar.

2.3.3 Gefahrgut

Mit Containerschiffen werden neben Nahrungsmitteln, elektronischen Exportartikeln und anderen Konsumgütern jeder Art auch Güter wie Chemikalien und andere Stoffe, die eine Gefahr für die Umwelt, insbesondere auch für die Besatzung und das Schiff darstellen, transportiert. Den Umgang mit gefährlicher Ladung beim Seetransport regelt die *Inter-governmental Maritime Consultative Organization* (IMCO) durch Empfehlungen, die im *International Maritime Dangerous Goods Code* (IMDG-Code) festgehalten sind. Diese Empfehlungen werden von den zur IMCO gehörenden Vertragsländern im nationalen Recht übernommen und unter Umständen durch zusätzliche landesspezifische Regelungen verschärft. Das entsprechende deutsche Gesetz ist die *Gefahrgutverordnung See* (GGVSee).

Unterschieden werden neunzehn Gefahrgutklassen, welche in Tabelle 6 zusammenfassend dargestellt sind. Bei zwei oder mehr zu verstauenden Gefahrgut-Containern, müssen für jede auftretende Klassenkombination allgemeine und bei einigen Kombinationen zusätzlich spezielle Trennungsvorschriften beachtet werden. Die Anzahl der zu beachtenden Richtlinien einerseits und die Gefahr für die Umwelt bei deren Nichtbeachtung andererseits sind dabei so groß, daß beispielsweise bei Hapag Lloyd eine Abteilung ausschließlich dafür zuständig ist, die von der Stauplanungsabteilung vorgeschlagenen Plätze für Gefahrgut-Container, auf deren Zulässigkeit zu prüfen.

Bei der Zusammenladung von Gefahrgut-Containern werden vier allgemeine Trennungsvorschriften unterschieden, wobei die schwächste Trennung bei Vorschrift 1 und die strengste bei anzuwendender Vorschrift 4 zu realisieren ist. Die Gefahrgut-Matrix in Tabelle 7 gibt einen Überblick über die sich aus dem Zusammentreffen zweier Gefahrgut-Container ergebenden allgemeinen Trennungsvorschriften.

Die 17 unterschiedenen Klassen (1.1, 1.2, 1.5 werden zusammengefaßt betrachtet) ergeben 153 verschiedene einzeln zu beachtende Kombinationen, wovon für 93 Kombinationen allgemeine Trennungsvorschriften gelten. Besteht keine allgemeine Vorschrift (gekennzeichnet durch ein X) bedeutet dies, daß es für die Waren innerhalb einer Klasse unterschiedliche Vorschriften gibt. Teilweise können zwei Container hierbei auch ohne Trennung verstaut werden.

deutsche Bezeichnungen[34]	englische Bezeichnungen[35]
1. Explosive Stoffe und Gegenstände mit Explosivstoff	1. Explosives
2.1 Entzündbare Gase 2.2 Nicht giftige, nicht entzündbare Gase 2.3 Giftige Gase	2.1 Flammable gases 2.2 Non-toxic, non-flammable gases 2.3 Poisonous gases
3. Entzündbare Flüssigkeiten	3. Flammable liquids
4.1 Entzündbare feste Stoffe 4.2 Selbstentzündliche Stoffe 4.3 Stoffe, die in Berührung mit Wasser entzündbare Gase entwickeln	4.1 Flammable solids 4.2 Spontaneously combustible substances 4.3 Substances which are dangerous when wet
5.1 Entzündend (oxydierend) wirkende Stoffe 5.2 Organische Peroxide	5.1 Oxidizing substances 5.2 Organic peroxides
6.1 Giftige (toxische) Stoffe 6.2 Ansteckungsgefährliche Stoffe	6.1 Poisons 6.2 Infectious substances
7. Radioaktive Stoffe	7. Radioactive materials
8. Ätzende Stoffe	8. Corrosives
9. Verschiedene gefährliche Stoffe und Gegenstände	9. Miscellaneous dangerous substances and articles

Tabelle 6: Gefahrgutstoffe

Unterschieden wird zwischen einer vertikalen und zwei horizontalen Dimensionen, der Schiffslängsrichtung und der Schiffsquerrichtung, sowie zwischen der Behandlung von zwei geschlossenen, einem geschlossenen und einem offenen und zwei offenen Gefahrgut-Containern. Horizontal müssen dabei Abstände von einem bis zu vier TEU und/oder eine bestimmte Anzahl von trennenden Schotts eingehalten werden. In vertikaler Richtung ist es nur für zwei geschlossene Container der Vorschrift 1 erlaubt, sie in den selben Stack ohne Trennung durch ein Deck zu stellen. Bei jeder anderen Vorschrift ist das Bilden einer vertikalen Linie ohne

[34] Storck91, S. 117

[35] Storck92, S. 94

Decktrennung, in Vorschrift 4 sogar mit Decktrennung verboten. Grundlage der Betrachtung ist hierbei ein zu verstauender Container. Jeder andere Gefahrgut-Container, der nur eingeschränkt mit ihm zusammen verstaut werden darf, wird als *unverträglich* bezeichnet.

1.1,1.2,1.5	X																
1.3	X	X															
1.4	X	X	X														
2.1	4	4	2	X													
2.2	2	2	1	X	X												
2.3	2	2	1	X	X	X											
3	4	4	2	2	1	2	X										
4.1	4	3	2	1	X	X	X	X									
4.2	4	3	2	2	1	2	2	1	X								
4.3	4	4	2	X	X	X	1	X	1	X							
5.1	4	4	2	2	X	X	2	1	2	2	X						
5.2	4	4	2	2	1	2	2	2	2	2	2	X					
6.1	2	2	X	X	X	X	X	X	1	X	1	1	X				
6.2	4	4	4	4	2	2	3	3	3	2	3	3	1	X			
7	2	2	2	2	1	1	2	2	2	2	1	2	X	3	X		
8	4	2	2	1	X	X	X	1	1	1	2	2	X	3	2	X	
9	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Gefahrgut Klassen	1.1 1.2 1.5	1.3	1.4	2.1	2.2	2.3	3	4.1	4.2	4.3	5.1	5.2	6.1	6.2	7	8	9

Legende		
	X	Keine allgemeine Trennungsvorschrift
	1	Entfernt von
	2	Getrennt von
	3	Getrennt durch eine ganze Abteilung oder einen Laderaum von
	4	In Längsrichtung getrennt durch eine dazwischenliegende ganze Abteilung oder einen dazwischenliegenden Laderaum von

[36] vgl. Storck92, S. 94

In Schiffsquerrichtung befinden sich, wie in Abschnitt 2.2 beschrieben, die zur selben Bay gehörenden Stacks und in Schiffslängsrichtung die unterschiedlichen Bays. Ein Container Abstand entspricht in Längsrichtung einem TEU Abstand. Werden zwei Container als Zwischenraum gefordert, ist daher auch die Trennung durch einen 40er Container ausreichend.

Die Beschreibungen basieren auf den Kurzerklärungen und den genaueren Ausführungen der Tabelle „Table of segregation of containers on board container ships".[37] Abbildung 11 zeigt die Legende für die, die einzelnen Vorschriften illustrierenden Abbildungen.

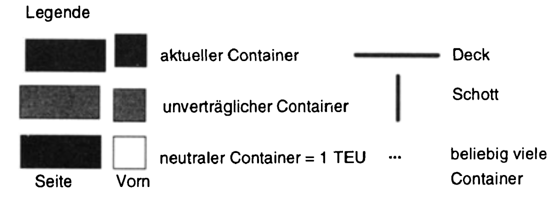


Abb. 11: Gefahrgut-Legende

Vorschrift 1 „Entfernt von - Away from -: Räumlich wirksam getrennt, damit unverträgliche Stoffe bei einem Unfall nicht in gefährlicher Weise aufeinander einwirken können. Sie können jedoch im selben Laderaum, in derselben Abteilung oder an Deck befördert werden, vorausgesetzt, daß horizontal ein Abstand von mindestens 3 m auch bei vertikaler Projektion eingehalten wird."[38] In horizontaler Richtung müssen hier nur zwei offene Container voneinander getrennt werden, dabei gilt sowohl in Längs- als auch in Querrichtung ein Container Abstand als ausreichend. Unter Deck genügt in Längsrichtung auch ein Schott als Trennung (vgl. Abb. 12). Folglich darf ein nicht verträglicher Container weder in einem benachbarten Stack derselben Luke noch in dem daneben liegenden Stack der Nachbar-Bay gestaut werden.

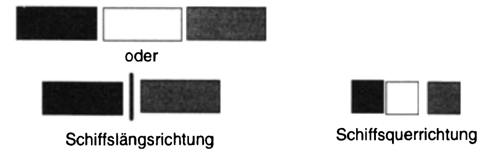


Abb. 12: Gefahrgut Vorschrift 1

[37] Storck92, S. 15

[38] Storck91, S. 119

Vorschrift 2 „Getrennt von - Separated from -: In verschiedenen Abteilungen oder Laderäumen, wenn die Stauung unter Deck erfolgt. Unter der Voraussetzung, daß ein dazwischenliegendes Deck gegen Feuer und Flüssigkeit widerstandsfähig ist, kann eine vertikale Trennung als gleichwertig angesehen werden, z.B. in verschiedenen Abteilungen. Bei Stauung 'An Deck' ist ein horizontaler Abstand von mindestens 6 m einzuhalten.“[39]

An Deck ist sowohl in Längs- als auch in Querrichtung ein Abstand von einem Container einzuhalten, lediglich bei zwei offenen Containern in Querrichtung sind zwei TEU Abstand notwendig. Dies entspricht einem Abstand von einer Bay in Längs-, sowie einem bzw. zwei Stacks in Querrichtung. Unter Deck ist in Schiffslängsrichtung ein Abstand durch einen Container oder ein Schott vorgeschrieben. In der Querrichtung muß die Länge des Abstandes, abhängig von der geschlossen / offen Kombination, ein oder zwei Container bzw. ein Schott betragen (vgl. Abb. 13). Folglich ist eine Bay Abstand im gleichen Laderaum oder ein Platz in einem beliebigen anderen Laderaum und ein Zwischenraum von einem oder zwei Stacks in der gleichen Luke oder ein beliebiger Platz in einer anderen Luke vorgesehen.

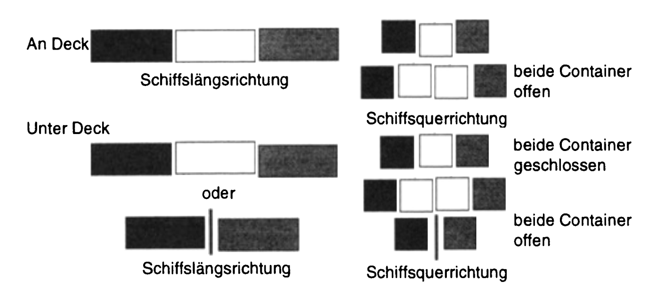


Abb. 13: Gefahrgut Vorschrift 2

Vorschrift 3 „Getrennt durch eine ganze Abteilung oder einen Laderaum von - Separated by a complete compartment or hold from -: Bedeutet entweder eine vertikale oder horizontale Trennung. Wenn die Decks nicht gegen Feuer und Flüssigkeit widerstandsfähig sind, ist nur eine Trennung in Längsrichtung durch eine dazwischenliegende ganze Abteilung oder einen dazwischenliegenden ganzen Laderaum zulässig. Bei Stauung An Deck' ist ein horizontaler Abstand von mindestens 12 m einzuhalten.“[40]

[39] Storck91, S. 119

[40] a.a.O.

Diese Regel schreibt An Deck in Längsrichtung einen - bei zwei offenen Containern zwei - Container Abstand vor, das sind Abstände mit einer Länge von ein bis zwei Bays. In Querrichtung erfordert die Regel zwei bzw. drei Container Abstand, was einem Abstand von zwei bis drei Stacks entspricht. Unter Deck sind hier in beide Richtungen ein bzw. zwei Schotte Abstand Pflicht, also eine Trennwand oder ein vollständig dazwischenliegender Laderaum bzw. eine Lukenwand oder eine vollständige Luke (vgl. Abb. 14 und 15).

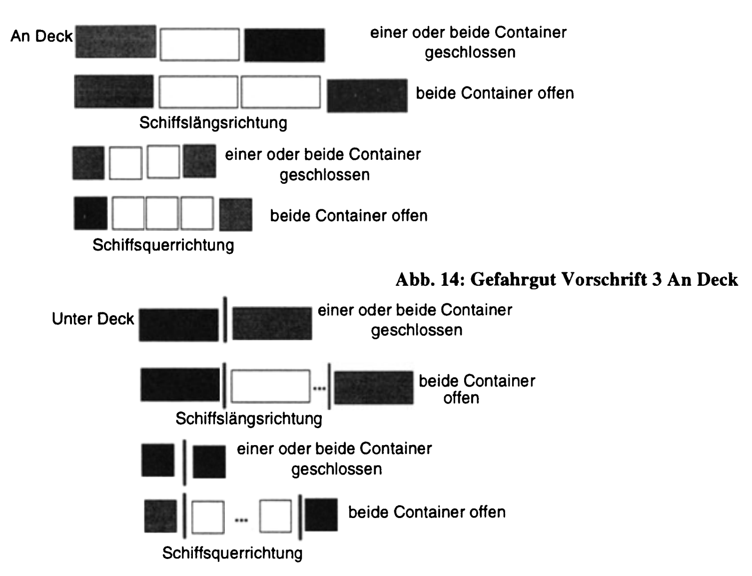


Abb. 14: Gefahrgut Vorschrift 3 An Deck

Abb. 15: Gefahrgut Vorschrift 3 Unter Deck

Vorschrift 4 „In Längsrichtung getrennt durch eine dazwischenliegende ganze Abteilung oder einen dazwischenliegenden Laderaum von - Separated longitudinally by an intervening complete compartment or hold from - : Eine nur vertikale Trennung allein genügt diesem Erfordernis nicht. Zwischen einem Versandstück 'Unter Deck' und einem 'An Deck' muß ein Abstand in Längsrichtung von mindestens 24 m einschließlich einer dazwischenliegenden Abteilung eingehalten werden. Bei 'An Deck' - Stauung ist ein horizontaler Abstand von mindestens 24 m einzuhalten.“[41]

---

[41] Storck91, S. 119

Diese Klasse beinhaltet die schärfsten Regelungen. In Querrichtung ist ein Zusammenladen verboten, d.h. stauen in derselben Bay ist nicht erlaubt. In Längsrichtung ist An Deck ein Mindestabstand von 24 m einzuhalten, das entspricht 4 TEU (zwei 40er oder vier 20er Container), Unter Deck sind 2 Schotte und damit ein vollständiger Laderaum Abstand vorgeschrieben (siehe Abb. 16).

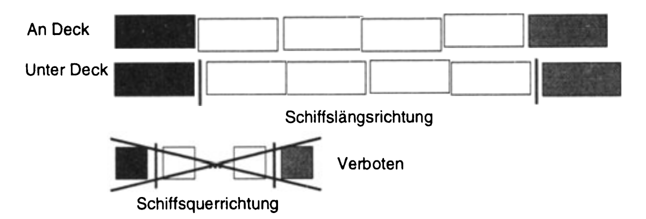


Abb. 16: Gefahrgut Vorschrift 4

Um diese große Anzahl von unterschiedlichen Forderungen zu systematisieren und gleichzeitig durch ausschließliches Betrachten von geschlossenen Containern zu verringern, stellt Tabelle 8 die Vorschriften noch einmal vereinfacht dar.

Vorschrift	Bestimmungen
1	• nicht im gleichen Stack
2	• nicht in einem benachbarten Stack und nicht in den entsprechenden Stacks der Nachbarbay
3	• An Deck mindestens zwei Stacks Abstand und nicht in den entsprechenden Stacks der Nachbarbay • Unter Deck nicht in der gleichen Luke und nicht im gleichen Laderaum
4	• in gleicher Bay verboten • Unter Deck mindestens ein Laderaum Abstand • An Deck 24m = 4 TEU also vier 20er Bays oder zwei 40er Bays Abstand

Tabelle 8: vereinfachte Gefahrgut - Stauvorschriften

2.4 Routen

Die Seeschiffahrt läßt sich allgemein nach der Beschäftigungsform in Bedarfs- und Linienschiffahrt unterteilen. Die Linienschiffahrt wird dadurch gekennzeichnet, daß es bei einer festgelegten Reihenfolge von anzulaufenden Häfen feste Abfahrts- und Ankunftszeiten gibt, während bei der Bedarfsschiffahrt der Schiffseinsatz unregelmäßig und ohne Bindung an einen Fahrplan erfolgt.[42] Die Handelsschiffahrt der großen Reedereien, wie beispielsweise Hapag Lloyd oder Evergreen, stellt aufgrund von einzuhaltenden Fahrplänen einen Teilbereich der Linienschiffahrt dar. In der Regel werden Rundreisen mit gleichem Ausgangs- und Endhafen durchgeführt. Für jedes Schiff wiederholt sich diese Rundreise dabei so lange, bis Reparaturen durchgeführt werden müssen oder Änderungen des Einsatzgebietes beschlossen werden.

Eine *Range* bezeichnet eine Menge von Häfen, deren Entfernungen untereinander im Vergleich zu den Entfernungen zu anderen Häfen relativ gering ist. Nach der Anzahl der Ranges, die eine Reise enthält, kann zwischen Ein-Relationen-Diensten, welche zwei Ranges verbinden und Rund-um-die-Welt-Diensten, die mehr als zwei Ranges in westlicher oder östlicher Richtung rund um die Welt verbinden, unterschieden werden.[43] Hierbei sind die Ein-Relationen-Dienste die am häufigste eingesetzte Form.

Man kann zwischen Häfen in denen Container gelöscht und verladen werden, Häfen in denen nur gelöscht wird und solchen in denen nur Container verladen werden unterscheiden. Reine Löschhäfen befinden sich häufig am Anfang einer Range und reine Ladehäfen an deren Ende.[44] Hapag Lloyd teilt sämtliche anzulaufenden Häfen in die Ranges Europa, West und Ost ein. Dabei umfaßt die Range West die Häfen in Nord- und Südamerika und die Range Ost die Häfen in Asien. Anhang 15.2 enthält eine Rangliste der größten Containerhäfen der Welt, gemessen am Containerumschlag im Jahr 1994.

[42] vgl. Geuther90, S. 23/24

[43] vgl. Schott89, S. 45

[44] vgl. Schott89, S. 47

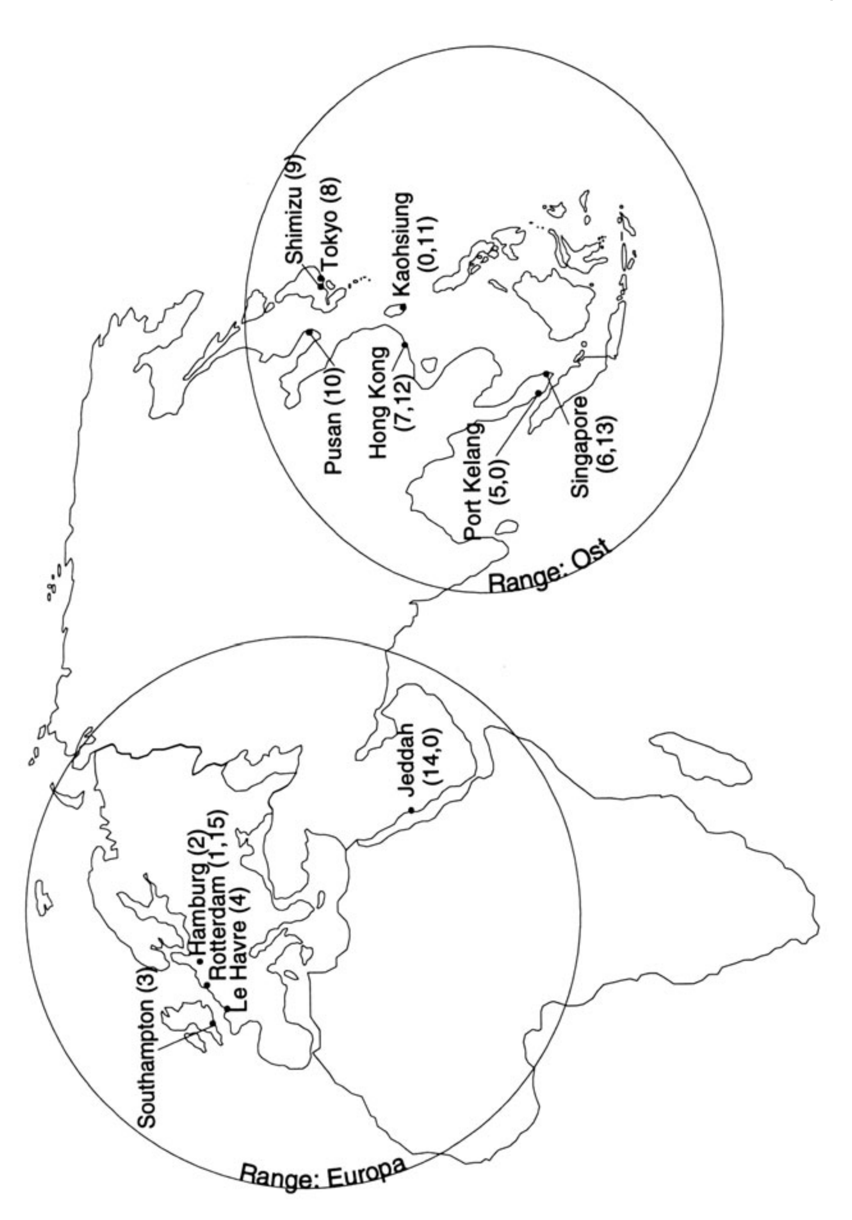


Abb. 17: Route im Ostasienverkehr

Hapag Lloyd setzt seine größten Containerschiffe im Ostasienverkehr (Far East) ein. Die dabei vom Containerschiff „Hoechst Express“ gefahrene Route im Zeitraum August - September 1995 kann aus Abbildung 17 entnommen werden.[45] Die in Klammern angegebenen Zahlen markieren die Reihenfolge, nach der die Häfen angelaufen werden. Rotterdam ist in diesem Beispiel sowohl Ausgangs- als auch Endhafen der Rundreise. Bei allen anderen Häfen, welche mit zwei Nummern gekennzeichnet sind, bedeutet die erste Zahl das Anlaufen zum Löschen und die zweite das Anlaufen zum Laden von Containern. Ist eine dieser beiden Zahlen Null, bedeutet dies, daß in dem Hafen nicht gelöscht oder geladen wurde. Im Vergleich mit der Häfenrangliste aus Anhang 15.2 wird deutlich, daß diese Route unter anderem sechs der sieben größten Häfen, gemessen am Containerumschlag in TEU 1994, bedient. Weitere wichtige Linien verkehren auf der North-Atlantic / South-Atlantic-Route und auf der USA / Canada West Coast - Route.[46]

2.5 Terminal

Terminals sind Umschlagsplätze und -anlagen mit hochtechnisierter Ausstattung, wobei die Seehafencontainerterminals die größten und wichtigsten Umschlagsplätze für Container darstellen.[47] In den nächsten Abschnitten werden die wichtigsten räumlichen und organisatorischen Bereiche sowie die auf einem Seehafencontainerterminal (kurz: Terminal) verwendeten Geräte vorgestellt. Abbildung 18 zeigt eine schematische Darstellung eines Terminals inklusive einiger Bereiche und Geräte.

2.5.1 Bereiche

Ein Terminal läßt sich räumlich in den wasserseitigen Umschlagsbereich, den landseitigen Umschlagsbereich und den Lagerplatzbereich einteilen.[48] Im wasserseitigen Umschlagsbereich werden Container- und Feederschiffe be- und entladen, während der landseitige Umschlagsbereich für den An- und Abtransport von Containern per Lkw und per Bahn bestimmt ist. Zum Lagerplatzbereich gehören der Yard, welcher der Hauptlagerplatz für volle Im- und

[45] Angaben von Herrn Grommé, Hapag-Lloyd, Hamburg, Gespräch vom 4. Oktober 1995

[46] vgl. Hapag-Lloyd93, S. 7ff.

[47] vgl. Kienzle91, S. 61

[48] vgl. Schott89, S. 48

Exportcontainer ist, das Leerlager, zur Aufbewahrung leerer Container, Packstationen, in denen Stückgüter in leere Container verladen werden und Reparaturstationen, zur Wartung und Instandsetzung von Containern. Hierbei können Teilbereiche, insbesondere die Reparaturstation, durch Fremdfirmen betrieben werden, was beispielsweise die HHLA realisiert hat.

Wichtige Abteilungen eines Terminals sind das Interchange, das sich mit der Koordination der Abfertigung von Lkws beim An- und Abtransport von Containern beschäftigt, die Hinterlandzentrale, die per Bahn transportierte Container abfertigt und den Containertransport auf dem Terminalgelände zwischen Yard, Packhallen, Leerlager und Reparaturbetrieb koordiniert, die Yardplanung, welche sich mit dem Problem der Containerlagerung auf dem Yard befaßt und schließlich die Stauplanung, die sich mit der Verfeinerung der von den Reedereien erstellten Staupläne für die zu betreuenden Containerschiffe und mit der Einsatzplanung der zum Be- und Entladen eingesetzten Containerbrücken beschäftigt.

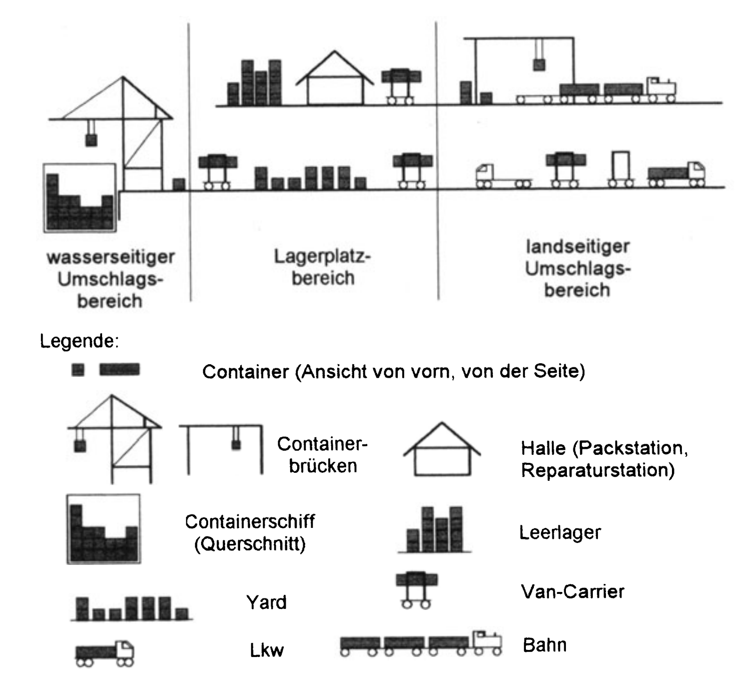


Abb. 18: Terminal

2.5.2 Geräte

Wichtige auf einem Terminal eingesetzte Geräte sind solche, die entweder zum Be- und Entladen der Transportmittel Schiff, Bahn und Lkw benötigt werden oder solche, die für den Transport von Containern vom landseitigen Umschlagsbereich über den Lagerplatzbereich zum wasserseitigen Umschlagsbereich und ebenso in umgekehrter Richtung eingesetzt werden.

Hierzu gehören erstens Containerbrücken, große auf Schienen laufende Portalkräne, welche wasserseitig das Schiff und landseitig die Gleisanlagen und Fahrstraßen überspannen und zum Be- und Entladen von Containern auf Schiffen, auf die Eisenbahn und teilweise auch auf Lkws eingesetzt werden.[49] Schwimmkräne zum wasserseitigen Be- und Entladen werden zusätzlich eingesetzt, wenn das Gewicht der zu verstauenden Container oder Schwergüter die maximale Containerbrückenbelastung von bis zu 50 t - bei den neuen Brücken bis zu 70 t - überschreitet. Insbesondere die Anzahl und Aufteilung der Containerbrücken zur Schiffsbetreuung sind bei der Stauplanung zu berücksichtigen, da die Hafenliegezeit eines Schiffes von der Be- und Entladedauer und diese von der Anzahl der eingesetzten Containerbrücken abhängt. Die Anzahl der pro Schiff einsetzbaren Containerbrücken ist von der Anzahl der gleichzeitig zu betreuenden Schiffe, von der Schiffsgröße und der Ladungsverteilung auf dem Schiff abhängig, wobei ein Mindestabstand von zwei TEU zwischen zwei Containerbrücken einzuhalten ist.

Als Zweites sind Van-Carrier zu erwähnen, die als Portalstapler zum Transport von Containern auf dem Terminalgelände und zum Be- und Entladen von Lkws eingesetzt werden. Sie sind in der Form eines umgedrehten U's aufgebaut und können bis auf eine Höhe von vier Containern verstellt werden, um auch Container von Stapeln aufnehmen zu können.[50] Sie sind genau wie die Containerbrücken mit einem Spreader, einem Zusatzgerät zum schnellen und sicheren Anheben von Containern, ausgerüstet. Spreader gibt es als starre Ausführung der Größen 20 Fuß und 40 Fuß sowie als hydraulisch verstellbare Ausführung.

---

[49] vgl. Kienzle91, S. 64

[50] a.a.O.

3 Ziele und Interdependenzen

Der folgende Abschnitt faßt die für die Stauplanung wichtigen Ziele und deren Beziehungen untereinander aus der Sicht der Reederei zusammen. Abbildung 19 stellt einen Zielhierarchiegraphen der in Abschnitt 3.1 Zielbeschreibung erläuterten Ziele dar und gibt einen Überblick über die logische Ableitung, der bei der Systementwicklung verwendeten operationalen Ziele. Weitere Beziehungen zwischen den Zielen werden im Abschnitt 3.2 Interdependenzen näher erläutert, wohingegen Abschnitt 3.3 Zielhierarchie eine Reihenfolge der einzelnen Ziele enthält, die nach der Präferenz der Einhaltung aufgestellt wird.

3.1 Zielbeschreibung

Bei den Zielen welche die Stauplanung verfolgt, kann zwischen dem wirtschaftlichen Ziel Gewinnmaximierung und dem allgemeinen Ziel Sicherheit unterschieden werden. Letzteres meint die Sicherheit für Schiff, Umwelt, Besatzung und Ladung.

3.1.1 Wirtschaftliche Ziele

Ein wichtiges wirtschaftliches Ziel eines Unternehmens ist in der Regel die Gewinnmaximierung. Dabei wird zwischen der negativen Komponente Kosten und der positiven Komponente Leistungen unterschieden. „Kosten lassen sich im Sinne des wertmäßigen Kostenbegriffes als bewerteter, leistungserstellungsbedingter Güter- und Dienstleistungsverzehr definieren.“[51] „Der Begriff Leistung wird nicht nur im allgemeinen Sprachgebrauch, sondern auch im betriebswirtschaftlichen Schrifttum unterschiedlich definiert und interpretiert.[...] Wenn man von Kosten- und Leistungsrechnung spricht, verwendet man Leistungen als Gegenbegriff der Kosten. In diesem Fall ist Leistung als Wert der innerhalb einer bestimmten Periode durch die Produktion hervorgebrachten Güter und Dienstleistungen im Sinne von Betriebsertrag definiert.“[52] Betrachtet werden in diesem Zusammenhang nur die kurzfristig veränderlichen, variablen Kosten und Leistungen.

[51] Hummel/Männel90, S. 390

[52] a.a.O., S. 397

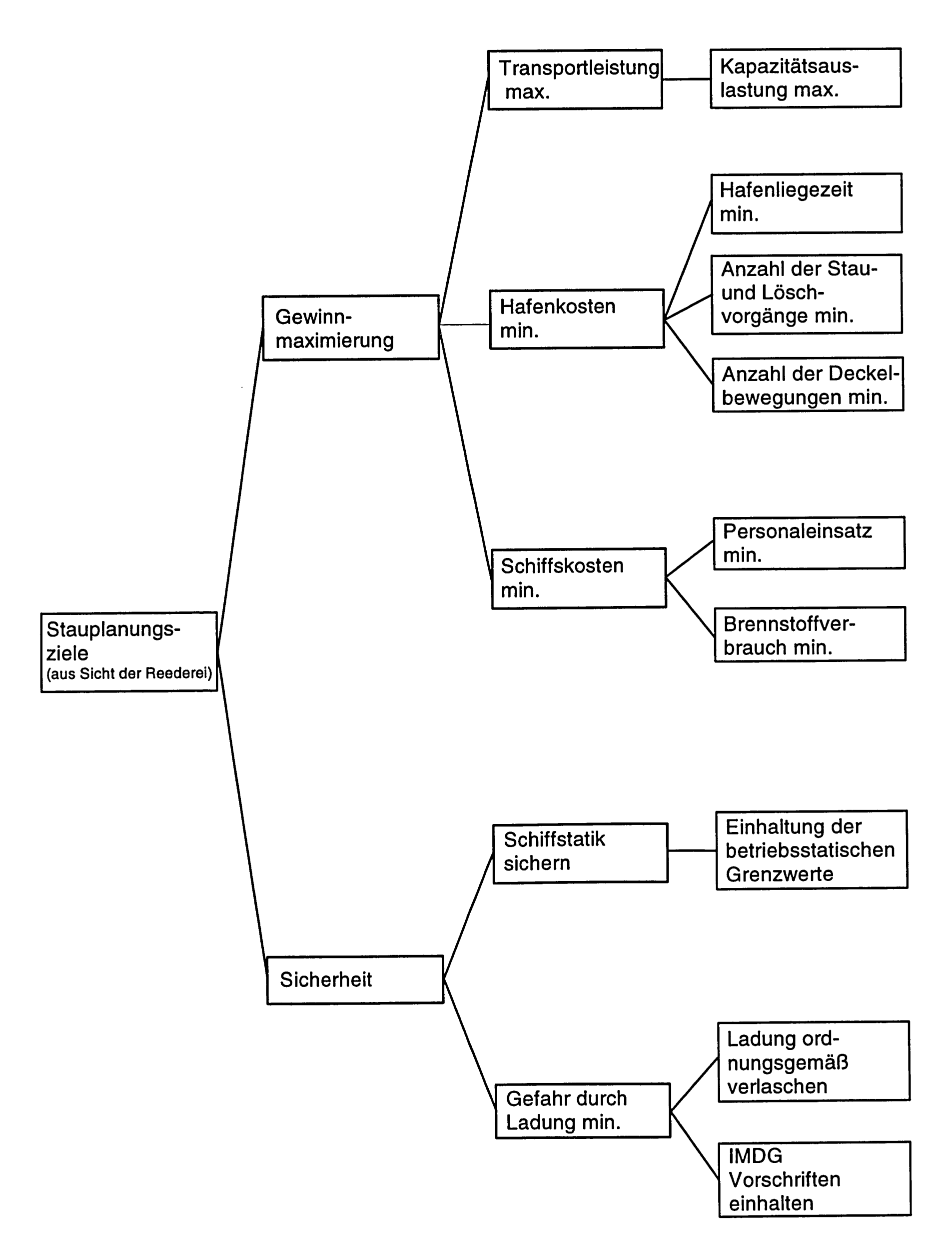


Abb. 19.1: Zielhierarchiegraph

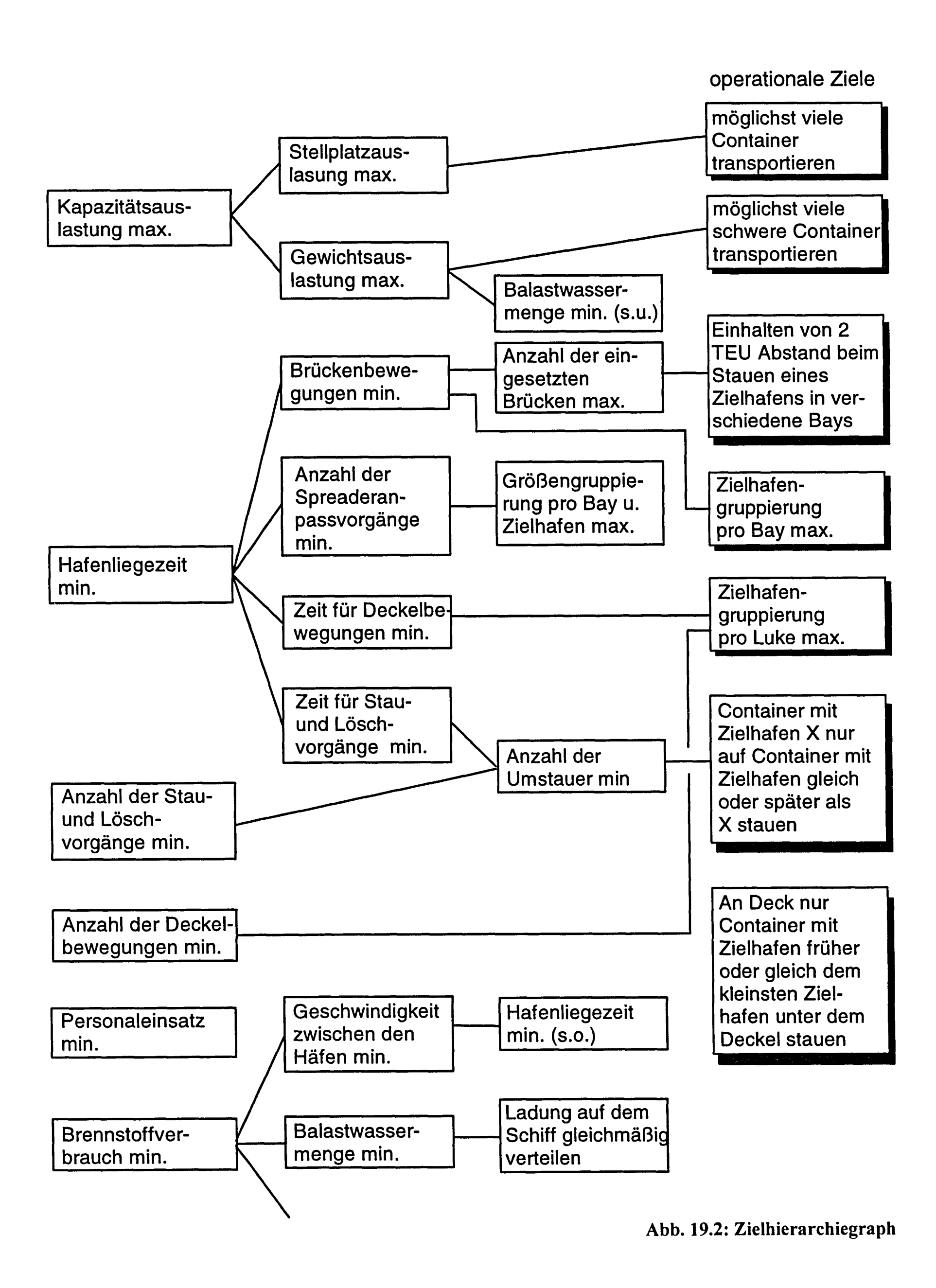


Abb. 19.2: Zielhierarchiegraph

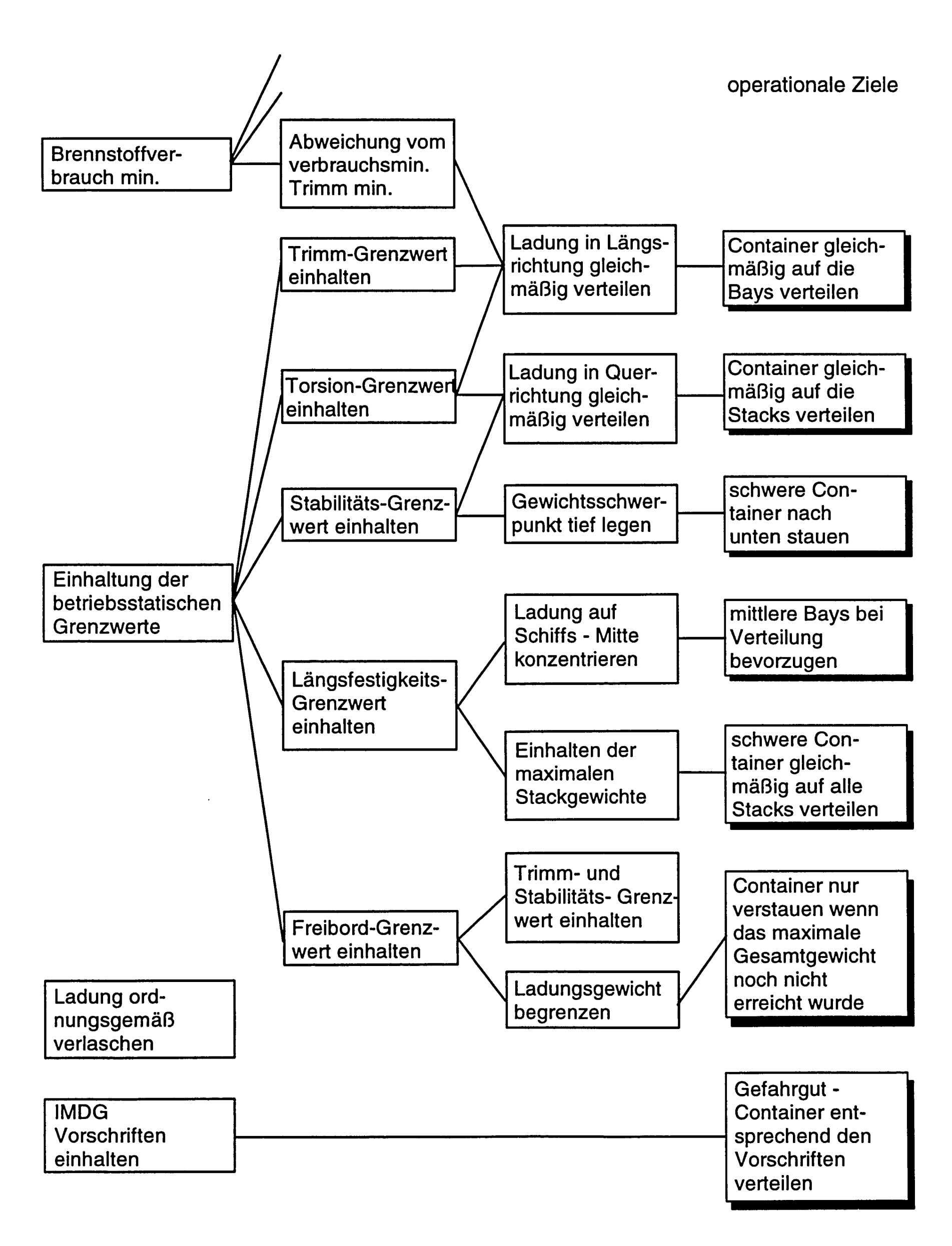


Abb. 19.3: Zielhierarchiegraph

Beim Transport von Containern mit Containerschiffen entstehen einerseits Kosten im Hafen durch die vom Terminal in Rechnung gestellten Dienstleistungen beim Verstauen und Löschen der Ladung, die im folgenden zusammenfassend als *Hafenkosten* beschrieben werden. Andererseits entstehen Kosten auf dem Schiff während der Rundreise, welche der Begriff *Schiffskosten* zusammengefaßt. Entstehende Leistungen sind die durch den Transport von Containern und Stückgütern erzeugten *Transportleistungen.*

3.1.1.1 Transportleistung

Die Transportleistung eines Containerschiffes ist durch die maximale Kapazität beschränkt. Um die Transportleistung zu maximieren, muß folglich die Kapazitätsauslastung maximiert werden. Hierbei kann zwischen der *Stellplatzkapazität* und der *Gewichtskapazität* unterschieden werden. Die Stellplatzkapazität in TEU ist durch die baulich bedingte Anzahl von Stellplätzen auf dem Schiff festgelegt, während die Gewichtskapazität durch das maximale Gesamtgewicht des Schiffes beschränkt ist.

Um die *Stellplatzauslastung zu maximieren*, müssen so viele Container wie möglich mitgenommen werden. Diese Anzahl ist durch die Menge der in Auftrag gegebenen Transporte begrenzt. Es sollten also, wenn möglich, sämtliche Container befördert werden, für die ein Transportauftrag besteht.

Das *maximale Gesamtgewicht* des Containerschiffes umfaßt neben der fixen Größe Leergewicht, die nur geringfügig veränderlichen Gewichte der Vorräte und der Besatzung sowie die in einem größeren Rahmen variierbaren Gewichte für Brennstoffe und Ballastwasser. Die mitgeführte Brennstoffmenge orientiert sich an der zu fahrenden Strecke zwischen zwei geplanten Tankvorgängen und an der dabei gewählten Geschwindigkeit. Daher sind die einzigen direkt beeinflußbaren Größen der Gewichtsanteil des Ballastwassers und die Geschwindigkeit des Schiffes.

Ballastwasser muß immer dann zum Ausgleich geladen werden, wenn die Statik des Schiffes durch ungleichmäßig verteilte Gewichte gefährdet ist. Durch *gleichmäßige Verteilung der Ladung in Längs- und Querrichtung* kann die notwendige Ballastwassermenge minimiert und damit die Gewichtsauslastung durch Containerladung maximiert werden.

Die notwendige Geschwindigkeit ist abhängig von den im Fahrplan festgelegten Terminen und der benötigten Verweildauer in jedem Hafen. Wird die *Liegezeit pro Hafen minimiert*, so kann die Route mit einer möglichst geringen Geschwindigkeit gefahren werden, dies bewirkt, daß weniger Brennstoff gebraucht wird und dadurch auch mehr Ladung mitgeführt werden kann (vgl. 3.1.1.2 und 3.1.1.3).

Die *Maximierung der Gewichtsauslastung* kommt als Ziel dann in Frage, wenn entweder für die zu verladenen Container genügend Stellplätze zur Verfügung stehen, das maximale Gesamtgewicht jedoch überschritten wird oder wenn mehr Container verladen werden sollen als Stellplätze frei sind. In beiden Fällen muß eine Auswahl der zu verstauenden Container getroffen werden. Objektiv sollten dabei die Container bevorzugt werden, für deren Transport die höchste Frachtrate gezahlt wird. In der Praxis haben bei der Auswahl häufig andere Ziele eine höhere Priorität, wie z.B. die Zufriedenheit wichtiger Kunden.

Nach Aussagen von Hapag-Lloyd Mitarbeitern unterscheiden sich im Ost-Asien-Verkehr die Art der Kapazitätsauslastungen auf der Hinreise (Europa - Asien) und auf der Rückreise (Asien - Europa) voneinander. Während durch die Verschiffung schwerer Industriegüter auf der Hinreise die Gewichtskapazität stärker als die Stellplatzkapazität ausgelastet ist, überwiegt durch den Transport leichterer Elektronikartikel auf der Rückreise die Stellplatzkapazitätsauslastung.

3.1.1.2 Hafenkosten

Faktoren, die im Hafen bei der Abfertigung eines Containerschiffes Kosten verursachen, sind die *Hafenliegezeit*, die *Anzahl der Stau- und Löschvorgänge* und die *Anzahl der benötigten Deckelbewegungen.*

Die *Hafenliegezeit* eines Schiffes wird als die Zeit zwischen dem An- und Ablegen am Terminal definiert.[53] Einen zeitlichen Rahmen durch Ankunfts- und Abfahrtstage für jeden einzelnen Hafen gibt der Fahrplan der Route vor. Durchschnittlich liegt ein 4400 TEU fassendes Containerschiff ca. 30 Stunden im Hamburger Hafen. Der berechnete Betrag ist zeitlich

[53] vgl. Schott89, S. 61

gestaffelt, wobei durch den Terminal verursachte Verzögerungen nicht berücksichtigt werden. Die Stauplanung kann die Hafenliegezeit insofern beeinflussen, daß die zu löschenden und zu ladenden Container so auf dem Schiff verteilt bzw. verplant sind, daß die Abfertigung bei optimalem Terminaleinsatz möglichst schnell vorgenommen werden kann.

Die Hafenliegezeit ist zusammengesetzt aus den Zeiten für die gesamten Stauvorgänge, für sämtliche Deckelbewegungen, für Spreaderanpaßvorgänge, für Brückenbewegungen sowie anderen nicht durch die Stauplanung beeinflußten Zeiten.

Die *Anzahl der Brückenbewegungen* und somit die dafür benötigte Zeit kann durch den Einsatz von möglichst vielen Containerbrücken, die wenig bewegt werden, statt wenigen häufig bewegten Brücken, reduziert werden. Voraussetzung dafür ist das *Einhalten des benötigten Mindestabstandes von 2 TEU zwischen zwei Brücken.* Daher sollten Container mit gleichem Zielhafen möglichst nicht in direkt nebeneinander liegenden Bays, sondern je nach Bay-Typ mit 1 bis 2 Bays Abstand verplant werden.

Durch *Verplanen von möglichst wenig unterschiedlichen Zielhäfen pro Bay* kann die Anzahl der Brückenbewegungen ebenfalls minimiert werden, da dies beim Löschen der Ladung zur Konzentration auf wenige Bays führt. Befährt ein Containerschiff mit wenigen Bays eine Route mit sehr vielen Zielhäfen, kann diese Zielsetzung beim Verstauen aber auch das Gegenteil bewirken. Das Verladen von Containern, die gleichmäßig über die Zielhäfen verteilt sind, würde dazu führen, daß viele Bays durch Containerbrücken bedient werden müßten, wodurch sich sehr viele Brückenbewegungen ergäben.

In der Praxis wird innerhalb einer Range so gut wie kein Container transportiert. Daher reduziert sich bei der Gesamtzahl von zwölf Häfen in der Beispielroute (vgl. 2.4 Routen), mit fünf Häfen in der Europa-Range und sieben Häfen in der Ost-Range die Anzahl der möglichen Zielhäfen auf sieben bzw. fünf. Bei insgesamt 19 Bays der unterschiedlichsten Typen auf dem Beispielschiff „Hoechst Express“ dürften durch das Ziel *Zielhafengruppierung pro Bay maximieren* die positiven Effekte überwiegen.

Spreaderanpaßvorgänge sind nötig, wenn mit starren 20 Fuß oder 40 Fuß Spreadern ausgerüstete Containerbrücken unterschiedlich große Container bewegen müssen. Durch maximale

Größengruppierung pro Bay, d.h. wenn in jeder Bay entweder nur 40er oder nur 20er Container zu verstauen sind, kann die gesamte Anzahl, und damit die dafür benötigte Zeit, der Spreaderanpaßvorgänge minimiert werden. Die meisten Terminals, z.B. auch die der HHLA, setzen hydraulisch verstellbare Spreader ein, die schnell zwischen den verwendeten Größen wechseln können und auch für ungewöhnliche Größen wie 45 Fuß einsetzbar sind. Aus diesem Grund wird der Einfluß der Spreaderanpassung auf die Stauplanung im folgenden nicht weiter betrachtet.

Die verbleibenden stauplanabhängigen Einflußfaktoren auf die Hafenliegezeit sind die *Deckelbewegungen* und die *Stau- und Löschvorgänge*. Diese beziehen sich auf die gesamten in einem Hafen notwendigen Deckelbewegungen bzw. auf sämtliche auszuführende Containerbewegungen und können daher gemeinsam mit den die Hafenkosten beeinflussenden Zielen Anzahl Deckelbewegungen minimieren und Anzahl Stau- und Löschvorgänge minimieren behandelt werden. Diese Ziele wirken sich auf die Hafenkosten aus, da pro bewegtem Deckel oder Container vom Terminal ein teilweise nach dem Gewicht gestaffelter Betrag erhoben wird.

Die *Anzahl der Stau- und Löschvorgänge* kann nur dadurch sinnvoll reduziert werden, daß jeder Container nicht öfter als zweimal bewegt wird, und zwar beim Laden im Ursprungshafen und beim Löschen im Zielhafen. Container, die häufiger bewegt werden, nennt man Umstauer. Folglich heißt das zu beachtende Ziel Anzahl der Umstauer minimieren. Umstauer, die durch Ändern des Zielhafens durch den Auftraggeber oder durch defekte Container entstehen, kann die Stauplanung nicht verhindern. Es sollte jedoch vermieden werden, daß durch Planungsfehler oder Änderung der Prioritäten Umstauer entstehen. Wenn sichergestellt wird, daß einerseits kein Container über einem, der früher entladen werden muß, verstaut wird und andererseits auf einen Lukendeckel kein Container gestaut wird, der später gelöscht werden soll als ein beliebiger Container unter dem Deckel, kann durch die Planung kein Umstauer entstehen.

Die *Anzahl der benötigten Deckelbewegungen* hängt davon ab, wieviele Luken be- und entladen werden müssen. Durch Zielhafengruppierung pro Luke wird erreicht, daß in einer Luke nur wenige Container mit unterschiedlichen Zielhäfen enthalten sind; im Idealfall haben sämtliche Container in einer Luke den gleichen Zielhafen. Der positive Effekt beim Löschen

ist sofort klar, beim Verladen können jedoch bei sehr vielen unterschiedlichen Zielhäfen die negativen Effekte durch diese Vorschrift überwiegen. Bei einer realistischen Anzahl von bis zu 10 Zielhäfen bei 19 Bays mit ca. 57 Luken kann durch Einhalten dieses Zieles die Anzahl der Deckelbewegungen reduziert werden.

3.1.1.3 Schiffskosten

Durch die Stauplanung beeinflußbare Kostenfaktoren auf dem Schiff sind der *Brennstoffverbrauch* und der für die *Gewährleistung der Sicherheit* benötigte Personaleinsatz.

Der *Brennstoffverbrauch* eines Schiffes ist proportional zu der Funktion aus Geschwindigkeit, Verdrängung und Trimm.[54] Die Durchschnittsgeschwindigkeit auf der gesamten Route setzt sich aus den Geschwindigkeiten zwischen den einzelnen Häfen zusammen, die zur Einhaltung des Fahrplanes notwendig sind. Durch möglichst kurze Hafenliegezeiten können diese Geschwindigkeiten folglich reduziert werden (zur Hafenliegezeit vgl. Abschnitt 3.1.1.2 Hafenkosten).

Die Verdrängung kann nur sinnvoll durch Verringerung des Ballastwassers reduziert werden, welches zur Gewährleistung der Sicherheit des Schiffes geladen wird. Durch *gleichmäßiges Verplanen der Ladung auf dem Schiff in Längs- und Querrichtung* kann die notwendige *Menge an Ballastwasser minimiert* werden.

Der *verbrauchsminimale Trimm* kann durchaus vom Trimmwert Null abweichen. „Im Extremfall wird der durch Übernahme von Ballastwasser verursachte Brennstoffmehrverbrauch durch den aufgrund eines verbrauchsgünstigeren Trimms erzielten Minderverbrauchs überkompensiert, d.h. trotz Verdrängungserhöhung ist der Leistungsbedarf gesunken.“[55] Auch diese Schwimmlage des Schiffes kann bereits durch die Verteilung der Container ohne zusätzliches Laden von Ballastwasser erreicht werden.

---

[54] vgl. Schott89, S. 64

[55] Schott89, S. 65

Der *Personaleinsatz* auf dem Schiff kann mittels zielgerechter Stauplanung reduziert werden, indem bereits während der Planung auf die Sicherheit gefährdende Faktoren wie ungünstige Trimm-, Torsions-, und Stabilitätswerte geachtet und damit eine Korrektur des Stauplanes durch das Schiffspersonal überflüssig wird.

3.1.2 Sicherheit

Bei dem Ziel *Sicherheit gewährleisten* geht es vor allem darum, bestehende Vorschriften für die Sicherheit der Besatzung, der Ladung und dem Schiff allgemein einzuhalten. Dazu gehören die *Sicherung der Schiffsstatik*, da Beschädigungen am Schiffsrumpf oder gar das Kentern des Schiffes während der Reise ein hohes Risiko für alle Bereiche darstellen, sowie die *Vermeidung einer Gefahr durch die geladenen Container.*

Neben dem *ordnungsgemäßen Verlaschen der Ladung* beim Verstauen im Hafen, was ein Verrutschen während der Fahrt verhindern soll, sind insbesondere die *IMDG Vorschriften* für das Verstauen von Gefahrgut-Containern einzuhalten, damit unverträgliche Stoffe nicht in gefährlicher Weise aufeinander einwirken können (siehe Abschnitt 2.3.3 Gefahrgut).

Die Schiffsstatik kann durch *Einhalten der betriebsstatischen Grenzwerte* gesichert werden. Die Berechnung der Kennwerte für Freibord, Stabilität, Trimm, Torsion und Längsfestigkeit wurde in Abschnitt 2.2.2 Betriebsstatik eingeführt. Durch die Verteilung der Ladung auf dem Schiff werden diese Werte stark beeinflußt.

So kann der Trimm durch eine *gleichmäßige Ladungsverteilung in Schiffslängsrichtung*, also gleichmäßiges Verteilen auf die Bays, begrenzt werden. Die Stabilität wird durch *gleichmäßiges Verteilen der Ladung in Querrichtung*, auf die Stacks in jeder Bay verbessert. Liegt der Gewichtsschwerpunkt des Containerschiffes tief, so erhöht sich die Stabilität zusätzlich. Dadurch vergrößert sich die megazentrische Anfangshöhe, was durch eine *Konzentration der schweren Container auf die untersten Tiers* erreicht werden kann. Die Torsion wird durch *gleichmäßiges Verteilen in Längs- und Querrichtung reduziert.*

Eine Verbesserung der Längsfestigkeit kann einerseits durch striktes Einhalten der maximalen Stackgewichte mittels *gleichmäßigem Verteilen besonders schwerer Container auf alle Stacks*

und andererseits durch *Konzentrieren der Ladung in der Schiffsmitte* erreicht werden. Die Bays in der Schiffsmitte sollten bevorzugt beladen werden, da Containerschiffe - wie in Abschnitt 2.2.2.5 Längsfestigkeit beschrieben - typische Hoggingschiffe sind. Diese neigen dazu, sich nach oben zu biegen, was durch Erhöhen der Gewichte in der Schiffsmitte reduziert werden kann. Dieses Ziel wird schon dadurch unterstützt, daß die Bays mit dem größten Fassungsvermögen in der Schiffsmitte liegen.

Der Freibord kann nach Begrenzung der ihn negativ beeinflussenden Trimm- und Stabilitätswerte durch *Einschränkung des Ladungsgewichtes auf ein maximales Gesamtgewicht* reduziert werden.

3.1.3 Operationale Ziele

Als operationale Ziele werden die Ziele bezeichnet, welche in ihren wesentlichen Bestimmungselementen Zielinhalt, Zielausmaß, Zielerreichungsrestriktionen, Zuständigkeiten und verfügbaren Ressourcen hinreichend präzise formuliert sind[56] und so direkt als Vorschriften formuliert werden können. Die beschriebenen wirtschaftlichen Ziele sowie das Ziel Sicherheit ergeben folgende operationale Ziele (vgl. Abb. 19 Zielhierarchiegraph):

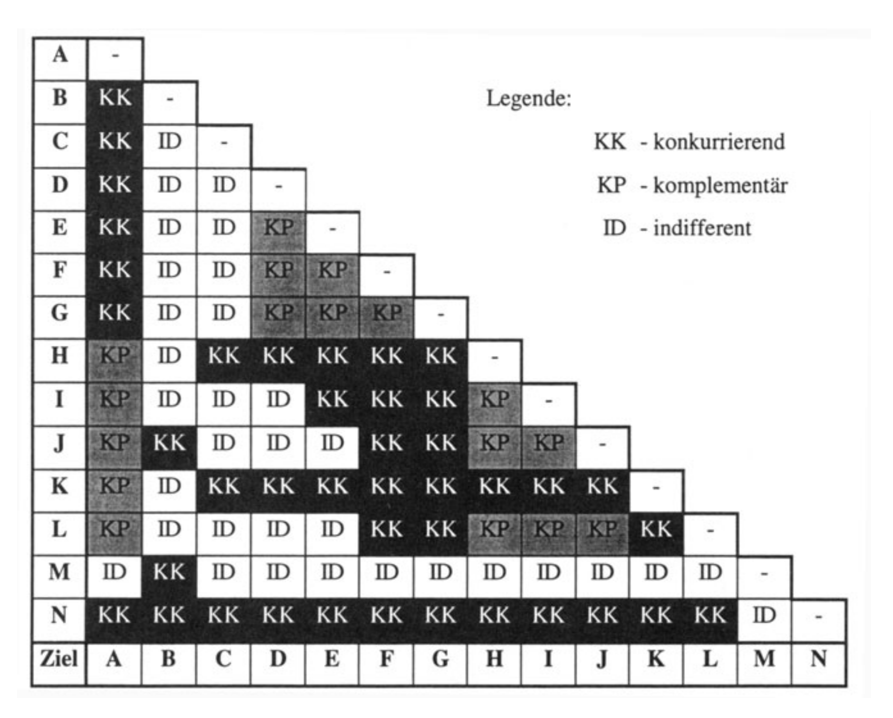
A) möglichst viele Container transportieren
B) möglichst viele schwere Container transportieren
C) Einhalten von 2 TEU Abstand beim Stauen eines Zielhafens in verschiedene Bays
D) Zielhafengruppierung pro Bay maximieren
E) Zielhafengruppierung pro Luke maximieren
F) Container mit Zielhafen X nur auf Container mit Zielhafen gleich oder später als X stauen
G) An Deck nur Container mit Zielhafen früher oder gleich dem kleinsten Zielhafen unter dem Deckel stauen
H) Container gleichmäßig auf Bays verteilen
I) Container gleichmäßig auf Stacks verteilen
J) schwere Container nach unten stauen
K) mittlere Bays bei Verteilung bevorzugen
L) schwere Container gleichmäßig auf alle Stacks verteilen
M) Container nur verstauen wenn das maximale Gesamtgewicht noch nicht erreicht ist
N) Gefahrgut-Container entsprechend den Vorschriften verteilen

---

[56] vgl. Schierenbeck89, S. 67

3.2 Interdependenzen

Zwischen sämtlichen operationalen Zielen bestehen Beziehungen; einen Überblick ermöglicht Tabelle 9. Die Interdependenzen zwischen zwei Zielen X und Y sind entweder konkurrierend (mehr X ⇒ weniger Y), komplementär (mehr X ⇒ mehr Y) oder indifferent (X und Y sind voneinander unabhängig).



A	-													
B	KK	-												
C	KK	ID	-											
D	KK	ID	ID	-										
E	KK	ID	ID	KP	-									
F	KK	ID	ID	KP	KP	-								
G	KK	ID	ID	KP	KP	KP	-							
H	KP	ID	KK	KK	KK	KK	KK	-						
I	KP	ID	ID	ID	KK	KK	KK	KP	-					
J	KP	KK	ID	ID	ID	KK	KK	KP	KP	-				
K	KP	ID	KK	KK	KK	KK	KK	KK	KK	KK	-			
L	KP	ID	ID	ID	ID	KK	KK	KP	KP	KP	KK	-		
M	ID	KK	ID	ID	ID	ID	ID	ID	ID	ID	ID	ID	-	
N	KK	KK	KK	KK	KK	KK	KK	KK	KK	KK	KK	KK	ID	-
Ziel	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N

Legende:

KK - konkurrierend

KP - komplementär

ID - indifferent

Tabelle 9: Interdependenzen

Häufig treten indifferente Interdependenzen auf. So ist beispielsweise das Ziel, schwere Container nach unten zu stauen (Ziel J), unabhängig davon, daß ein Container nur verstaut dann werden darf, wenn das maximale Gesamtgewicht noch nicht erreicht worden ist (Ziel M). Weitere Beispiele sind Kombinationen des Ziels, möglichst viele schwere Container zu transportieren (Ziel B), mit den Zielen Maximierung der Zielhafengruppierung pro Bay bzw. pro Luke (Ziele D und E) sowie mit dem Ziel, einen Mindestabstand von 2 TEU beim Stauen eines Zielhafens in verschiedenen Bays einzuhalten.

3.2.1 Konkurrierende Ziele

Werden möglichst viele Container transportiert (Ziel A), so kann dies, je nach auftretender Gewichtsverteilung, die Absicht, möglichst viele schwere Container zu transportieren (Ziel B), erschweren. Striktes Einhalten von 2 TEU Abstand beim Stauen eines Zielhafens in verschiedenen Bays (Ziel C) sowie eine maximale Zielhafengruppierung pro Bay (Ziel D) oder pro Luke (Ziel D) könnte bewirken, daß einige Container nicht verplant werden können, obwohl noch Stellplatz vorhanden ist, was Ziel A ebenfalls widerspräche.

Die Zielsetzung, Gefahrgut-Container entsprechend den Vorschriften zu verteilen (Ziel N), kann nahezu jedem anderen Ziel zuwiderlaufen, da die Möglichkeit besteht, daß es keinen geeigneten Platz auf dem Schiff gibt und Container zurückbleiben müssen, obwohl noch Stellplatz- und Gewichtskapazität vorhanden sind. Möglicherweise müssen eine oder mehrere der Verteilungsregeln gebrochen werden, um einen zulässigen aber für die Anzahl der Umstauer oder die Statik ungünstigen Stauplatz auszuwählen.

Möglichst viele schwere Container zu transportieren (Ziel B) hat zur Folge, daß viele Container in die untersten Tiers verstaut werden müssen (Ziel J). Zusätzlich wird dies von dem Ziel, das maximale Gesamtgewicht einzuhalten (Ziel M), beschränkt. Das Einhalten von 2 TEU Abstand beim Stauen eines Zielhafens in verschiedene Bays (Ziel C) widerspricht bei vielen Containern für einzelne Zielhäfen dem Ziel, die Container gleichmäßig auf alle Bays zu verteilen (Ziel H) genauso wie dem Ziel, die mittleren Bays bei der Verteilung zu bevorzugen (Ziel K).

Das Maximieren der Zielhafengruppierung pro Bay (Ziel D) und pro Luke (Ziel E) kann ein gleichmäßiges Verteilen der Container auf Bays bzw. auf Stacks erschweren und das Ziel, die mittleren Bays zu bevorzugen, behindern. Die Ziele, Container mit Zielhafen X nur auf Container mit Zielhafen gleich oder später als X zu stauen (Ziel F) und An Deck nur Container mit Zielhafen früher oder gleich dem kleinsten Zielhafen unter dem Deckel zu stauen (Ziel G), stehen im Konflikt mit sämtlichen Verteilungszielen H bis L, die der gleichmäßigen Verteilung der Ladung auf das Schiff dienen.

Schließlich steht das Ziel, die mittleren Bays bei der Verteilung zu bevorzugen, den Zielen H, I und L entgegen, welche ein gleichmäßiges Verteilen der Container über die Bays und Stacks fordern.

3.2.2 Komplementäre Ziele

Komplementäre Beziehungen bestehen zwischen den Zielen D, E, F und G. Da eine Bay aus mehreren Luken besteht, erhöht die Zielhafengruppierung pro Luke direkt die Zielhafengruppierung pro Bay. Durch Stauen eines Containers mit Zielhafen X auf einen anderen mit gleichem Zielhafen bzw. auf den Deckel einer Luke, deren kleinster Zielhafen X ist, wird die Zielhafengruppierung automatisch pro Bay bzw. Luke erhöht. Wenn allerdings zugelassen wird, daß der Container mit Zielhafen X auf einen anderen mit Zielhafen später als X gestaut wird bzw. daß der Zielhafen unter dem Deckel kleiner als der des zu Verstauenden ist, reduziert sich diese Komplementarität.

Eine weitere Zielgruppe mit komplementären Beziehungen bilden die Ziele H, I, J und L. Gleichmäßiges Verplanen der schweren Container auf die Stacks korrespondiert mit der gleichmäßigen Verteilung sämtlicher Container über die Stacks. Schwere Container sind leichter nach unten zu stauen, wenn sie über sämtliche Stacks verteilt werden. Außerdem unterstützt gleichmäßiges Verplanen über alle Stacks eine gleichmäßige Verteilung über die Bays.

Möglichst viele Container können insbesondere dann transportiert werden, wenn die Schiffsstatik mit wenig Ballastwasser gesichert werden kann und daher die Gewichtskapazität die Stellplatzkapazität nicht einschränkt. Dies wird durch die gleichmäßige Verteilung der Ladung oder durch die Bevorzugung der mittleren Bays erreicht. Also hat auch das Ziel A mit den Zielen H, I, J, K und L komplementäre Beziehungen.

3.3 Zielhierarchie

Das wichtigste Ziel bei der Erstellung eines Stauplans muß immer die Sicherheit sein. Sämtliche die Stabilität negativ beeinflussenden Gewichtsverteilungen können in der Regel durch Ballastwasser ausgeglichen werden. Eine Reduzierung des Brennstoffverbrauchs durch gleichmäßiges Verteilen der Container rangiert weit hinter allen anderen zu beachtenden Zielen, insbesondere hinter dem Sicherheitsziel, und wird in Tabelle 10 unter Rang 5 geführt. Dagegen müssen die Gefahrgut-Trennvorschriften (Ziel N) zur Gewährung der Sicherheit auf jeden Fall eingehalten werden.

Aus betriebswirtschaftlicher Sicht folgen auf die Sicherheitsziele die Kapazitätsauslastungsziele. Ein Container sollte immer mitgenommen werden, solange die Kapazitäten noch nicht ganz ausgeschöpft sind, auch wenn durch seine Verstauung Umstauer entstehen oder die Zahl der Brücken- oder Deckelbewegungen sich erhöht. Durch Controllingmaßnahmen, wie das Vergleichen der entstehenden Kosten mit den Erlösen für jeden Umstauer, könnte eine bessere Gesamtzielerreichung gewährleistet werden. Darauf soll hier aber verzichtet werden, weil in der Praxis häufig subjektive Kriterien überwiegen. Daraus folgt, daß die Ziele A) und B) vor den Zielen C) bis G) rangieren. Da das maximale Gesamtgewicht die Gewichtskapazitätsauslastung begrenzt, können die Ziele B und M zusammen durch Ziel B betrachtet werden.

Durch Umstauer fallen in der Regel höhere Kosten an als durch zusätzliche Brücken- oder Deckelbewegungen, insbesondere weil sie in jedem Hafen, in dem ein Schiff mit einem Umstauer ankommt, die Stauplanerstellung erschweren. Daher stehen die Ziele F) und G) in der Rangfolge vor den Zielen C) bis E) (vgl. Tabelle 10).

Rang	Ziel
1	Sicherheit • Gefahrgutvorschriften einhalten (Ziel N)
2	Kapazitätsauslastung • Stellplatzkapazitätsauslastung maximieren (Ziel A) • Gewichtskapazitätsauslastung maximieren (Ziel B)
3	Umstauer minimieren (Ziele F und G)
4	Stauziele (Ziele C bis E)
5	Container gleichmäßig verteilen (Ziele H bis L)

Tabelle 10: Zielhierarchie

4 Stauplanung in der Praxis

In der Praxis teilen sich die Reederei, der das Containerschiff gehört, und die Terminals, welche von der Reederei mit dem Löschen und Laden von Containern beauftragt werden, die Erstellung des Stauplans. Die Reederei erstellt für jede Range mehrere voneinander abhängige Grobpläne, die hauptsächlich aus Zuordnungen von Containergruppen zu Stellplatzgruppen bestehen, während die Terminals, aufbauend auf dem Grobplan, einen Feinplan mit konkreten Zuordnungen von Containern zu Stellplätzen festlegen.

Während früher die Grob- und Feinpläne auf große Papierbögen mit vorgezeichneter Einteilung in Bays, Stacks und Tiers eingezeichnet wurden, wird heute die Planung vorwiegend am Computerbildschirm durchgeführt. Die Pläne werden aber nicht mit automatischen Stauplanungsprogrammen, sondern weiterhin durch manuelle Planung mit Unterstützung durch Bildschirmübersichten erstellt.

4.1 Grobplanung

Die Grobpläne für jedes Schiff werden in den Stauzentralen der Reederei für die Ranges der gefahrenen Route erstellt. Hapag-Lloyd verfügt z.B. über drei Stauzentralen: Hamburg für die Range Europa, Singapur für die Range Ost und New Jersey für die Range West. Dabei ist fällt auf, daß sämtliche mit der Stauplanung beauftragte Mitarbeiter das Kapitänspatent besitzen. Dies deutet darauf hin, daß die Grobplanung einen guten Überblick über alle Eigenschaften eines Schiffes erfordert.

Vorgegangen wird hafenweise, jedoch nicht so strikt, daß sofort die gesamten Container eines Ursprungshafens verteilt werden. Angefangen mit den Spezialfällen Gefahrgut-, Thermal- und Übergrößen- bis zu den Standard-Containern, werden zunächst die Container verteilt, die problemlos untergebracht werden können. Zum Schluß sucht man für die übrig bleibenden Problemfälle passende Lösungen.

Ausgangsdaten sind der Stauplan des letzten Hafens der vorherigen Range und die Aufträge für die Häfen der aktuellen Range. Das größte Problem der Grobplanung ist hierbei die ständige Informationsunsicherheit. Die ersten Daten treffen etwa 6 Tage vor Anlaufen des ersten

Hafens der Range ein und werden in den folgenden Tagen ständig aktualisiert. Selbst während ein Schiff beladen wird, kann sich der Stauplan für den aktuellen Hafen noch ändern, z.B. wegen defekter Container.

Im Grobplan bekommen Gefahrgut-Container, Thermal-Container sowie Übergrößen-Container und Stückgüter feste Standorte auf dem Containerschiff zugeordnet. Die für Gefahrgüter vorgeschlagenen Plätze werden zusätzlich von einer speziellen Gefahrgutabteilung überprüft. Alle übrigen Container, für die nicht spezielle Vorschriften (vgl. 2.3 Stauvorschriften) eingehalten werden müssen, werden in Gruppen zusammengefaßt und bekommen Bereiche, aber keine festen Plätze auf dem Schiff zugeordnet.

Die Gruppen werden pro Ursprungshafen aus Standard-Containern mit gleichem Zielhafen und gleicher Größe gebildet. Anhand der Durchschnittsgewichte je Gruppe wird bei der Zuordnung zu Bereichen des Schiffes bereits die Schiffsstatik mitberücksichtigt, indem grob die Ziele H, I und K, also gleichmäßiges Verteilen auf Bays und Stacks, sowie tendentielles Bevorzugen der mittlere Bays, in die Planung einbezogen werden (vgl. 3.1.3 operationale Ziele).

Auch in der Praxis ist das wichtigste bei der Grobplanung verfolgte Ziel die Sicherheit, also das Einhalten der Gefahrgutvorschriften und das Sichern der Schiffsstatik. Erst weit dahinter folgen - nach Aussagen der Hapag-Lloyd Stauplaner - die wirtschaftlichen Ziele, indem durch geschicktes Verteilen der Container versucht wird, sämtliche Transportaufträge mit möglichst wenig Umstauern, bei möglichst günstigem Brennstoffverbrauch durchzuführen.

4.2 Feinplanung

Der Feinplan wird von dem durch die Reederei beauftragten Terminal erstellt. Ausgangsdaten sind der für den Hafen erstellte Grobplan, der Stauplan des vorherigen Hafens, nach Entfernen der für den aktuellen Hafen bestimmten Containern, als Ist-Lade-Zustand und eine Liste der zu verstauenden Container.

Die im Grobplan vorgesehenen Plätze für Gefahrgut-, Thermal- und Übergrößen-Container werden in den Feinplan übernommen. Änderungen dieser Plazierungen dürfen nur in

Absprache mit der Reederei durchgeführt werden, selbst bei sehr kurz vor der Abfahrt des Containerschiffes auftretenden Problemen.

Ausgehend von dem im Grobplan festgelegten Bereich bekommen Standard-Container feste Plätze zugeordnet. Um einen möglichst tiefen Schwerpunkt zu erhalten, werden zunächst die schwersten Container in die am tiefsten im Schiffsrumpf gelegenen Tiers gestaut. Dafür werden Container jeder Größe nach Zielhäfen geordnet und für jeden Zielhafen absteigend nach dem Gewicht geordnet. Bei der Zuordnung der Container müssen neben dem maximalen Stackgewicht für jeden Stack, die Statikgrenzwerte für Trimm, Stabilität, Freibord, Torsion und Längsfestigkeit eingehalten werden.

Wichtigstes Ziel der Feinplanung ist, ebenso wie bei der Grobplanung, die Gewährleistung der Sicherheit. Gerade der Kapitän, der insbesondere für die Sicherheit des Containerschiffes verantwortlich ist, wird einem Feinplan nur dann zustimmen, wenn sich die Werte der Schiffsstatik, zumindest durch Hinzufügen von Ballastwasser, in einem zulässigen Rahmen bewegen. Das Minimieren der benötigten Ballastwassermenge ist ein weiteres Ziel. Andere Aspekte, wie z.B. die Minimierung der Umstauer oder die Maximierung der Kapazitätsauslastung, können in der Feinplanung nicht beeinflußt werden, da die im Grobplan vorgesehene feste Vorgabe von Plätzen und Bereichen eingehalten werden muß.

4.3 Eingesetzte Software

Da die bisher entwickelten theoretischen Verfahren[57] nicht sämtliche wichtige Planungsfaktoren berücksichtigen, sondern ganze Teilbereiche der Planung ausklammern, wie z.B. der Verzicht der Verstauung von 40er Container bei Pape et al. und dem generellen Verzicht auf Thermal- und Gefahrgut-Containern in sämtlichen Ansätzen, haben sich automatische Stauplanungssysteme bisher nicht in der Praxis durchgesetzt.

Die in den verschiedenen Bereichen eingesetzte Software hängt vom benötigten Leistungsumfang einerseits und von der Realisierung als Fremdsoftware oder Eigenentwicklung andererseits ab. Während die HHLA für die Feinplanung eine Eigenentwicklung einsetzt, benutzt

[57] vgl. Schott89, S. 71-104, vgl. weiter Pape/Bohm/Rieger79, S. 23-47, vgl. außerdem Shields84, S. 370-375

Hapag-Lloyd für die Grobplanung das von der Firma Müller+Blanck Software GmbH entwickelte Programm CAPSTAN. Als Beispiel für auf Containerschiffen eingesetzte Bordrechner enthält Kapitel 4.3.3 Schiff eine Beschreibung des Systems MACS3 der Firma SEACOS. Ferner wird im Abschnitt 4.3.4 kurz das Datei-Übergabeformat BAPLIE vorgestellt.

4.3.1 Reederei

Die Reederei Hapag-Lloyd benutzt seit 1992 das Programm CAPSTAN (Computer Aided Planned STowage And Networking) der Firma Müller+Blanck Software GmbH in Norderstedt bei Hamburg. Die aktuelle Version CAPSTAN3 ist ein auf Grafik basierendes Planungsinstrument für Container-Betreuung in einer Fensterumgebung.[58]

Die wichtigsten enthaltenen Module sind:

1. BAYPLAN HANDLING/EDITING TOOL
   zum Lesen und Erstellen von Bayplan Dateien im internationalen Standard-Format BAPLIE. Zusätzlich mit Zähl-, Such-, und Austauschfunktionen von Containerarten nach eingegebenen Attributen.

2. ON SCREEN PLANNING MODULE
   für die bildschirmunterstützte Erstellung von Stauplänen mit Übersichten zur Aufteilung der Containerbrücken, Anzahl der Umstauer und Verteilung der Gefahrgut-Container. Die enthaltene IMO-Gefahrgut-Datenbank ermöglicht die Einhaltung der IMDG-Trennungsvorschriften (vgl. 2.3.3 Stauvorschriften - Gefahrgut).

3. STABILITY/STRESS CALCULATOR
   für die Berechnung die Kennwerte für die Schiffsstatik. Die jeweils benötige Ballastwassermenge und -verteilung wird angezeigt und ein Überblick der Auswirkungen von manuellen Änderungen des Ballastwassers wird visualisiert.

[58] vgl. Müller+Blanck, S. 1ff.

4. MÜLLER+BLANCK MULTICAMM PACKAGE
als Schnittstelle zwischen dem Benutzer und den Kommunikationsmöglichkeiten Modem, Netz, ISDN, Telefax und Telex im BAPLIE Format oder als ASCII Textdatei.

5. REPORT GENERATOR
ermöglicht die Erstellung von benutzerdefinierten Berichten zusätzlich zu den Standard-Berichten, wie Bayplan oder Gewichtsverteilungen.

6. VESSEL DESCRIPTION MODULE
zur Beschreibung der betreuten Containerschiffe vom Bayplan über Position und Größe der Tanks bis zur Schiffsform.

CAPSTAN benötigt als Hardware entweder SCO UNIX Rechner oder IBM kompatible 80486 Computer mit 32 Mbyte RAM und mindestens 200 Mbyte Festplattenkapazität.

4.3.2 Terminal

Die HHLA verwendet zur Unterstützung der Stauplanung ein, durch die unternehmensinterne Programmentwicklungsabteilung in der Programmiersprache M (einer Weiterentwicklung von MUMPS: „Massachusetts General Hospital´s Utility Multiprogramming System“[59]), erstelltes Softwareprodukt.

Das angewendete Programm beinhaltet Bildschirmmasken zur Darstellung und Bearbeitung von Stauplänen sowie ein Modul zur automatischen Statikberechnung. Die Bildschirmmasken dienen dabei ausschließlich als Ersatz für die früher benötigten, oft unübersichtlichen Papierbögen. Das Programm enthält keine Funktionen zur automatischen Stauplanung. Jede Zuordnung von einem Container zu einem Stellplatz muß von Hand über die Tastatur eingegeben werden. Allerdings bietet das Statikmodul jederzeit die Möglichkeit, die Sicherheit eines Stauplanentwurfes zu überprüfen und die Menge des benötigten Ballastwasser zu bestimmen.

[59] vgl. Hesse89, S. 3

4.3.3 Schiff

Auf Containerschiffen haben Bordrechner die Aufgabe, ständig die Grenzwerte der Schiffsstatik zu ermitteln und bei auftretenden Problemen Korrekturen der Ballastwassermenge und -verteilung vorzuschlagen und durchzuführen. Außerdem sollte eine Übersicht der geladenen Container, insbesondere von Gefahrgut- und Thermal-Containern enthalten sein.

Das Unternehmen SEACOS entwickelt seit 1984 Bordrechner für alle Schiffstypen, wie z.B. Bulkcarrier, Containerschiffe, Ro/Ro Schiffe etc. „Das Grundprogramm MXMACS3 bietet die Be- und Entladungsposition mit integrierter Stabilitäts- und Festigkeitsrechnung auf der Grundlage der fest eingegebenen individuellen Schiffsdaten. Zusätzlich kann ein automatischer Beballastungsvorschlag im Hinblick auf gewünschte Trimmlagen und Tiefgänge unter gleichzeitiger Berücksichtigung von Stabilität und Festigkeit abgerufen werden.“[60]

Zu den Ergänzungsmodulen gehören TANKPLAN - für die graphische und zahlenmäßige Darstellung von Tankfüllungen -, BULKLIM - eine graphische Darstellung von Ladegrenzwerten -, ONLINE - zur Übernahme von Tankfüllständen, Tiefgängen, Trimm und Krängungswinkeln aus Meßanlagen - sowie BELCO - zur graphischen Veranschaulichung des Be- und Entladevorganges -.

Außerdem ist die Fähigkeit, Daten über Satellit oder Diskette in verschiedenen Formaten, z.B. BAPLIE, Text oder ASCII, zwischen Terminals, Reedereibüros und dem Ladungsrechner an Bord auszutauschen, in das System integriert.[61] Entwickelt wurde MACS3 für die Verwendung unter MS-Windows.

---

[60] o.V. in: Schiff & Hafen 12/94, S. 46

[61] vgl. a.a.O., S. 46

4.3.4 Übergabeformate

Ein wesentlicher Vorteil, der durch den Einsatz von Computern bei der Stauplanung entsteht, ist die Möglichkeit, einen Datensatz nur einmal einzugeben, damit dieser von den Stauplanern der Reederei und des Terminals sowie auf dem Schiff gelesen und verarbeitet werden kann. Dafür ist ein Austausch der Daten mit möglichst einheitlichen Übergabeformaten nötig.

Eine Form der Kommunikation zwischen zwei oder mehreren Unternehmen bzw. zwischen mehreren Vertretungen eines Unternehmens, bei der geschäftliche und technisch Daten sowie allgemeine Geschäftsdokumente nach standardisierten Formaten ausgetauscht werden können, ist EDI (Elektonic Data Interchange). EDI kann dabei definiert werden als elektronischer Austausch strukturierter Daten zwischen den Computeranwendungssystemen verschiedener Gesprächspartner mit einem Minimum an manuellen Eingriffen.[62]

Der von den Vereinten Nationen definierte internationale Standard heißt EDIFACT (Electronic Data Interchange for Administration, Commerce and Transport). EDI ist zwar an EDIFACT nicht zwingend gebunden, EDIFACT stellt jedoch einen weltweiten, branchenübergreifenden Nachrichtenstandard dar, der von immer mehr Firmen verwendet wird oder zumindest gelesen werden kann.

Innerhalb des EDIFACT-Standards gibt es viele Sub-Standards für bestimmte Teilbereiche der Kommunikation. Der im allgemeinen von den Reedereien, Terminals und Schiffen eingesetzte Sub-Standard für den Austausch von Stauplänen heißt BAPLIE.

[62] vgl. Müller-Berg94, S. 14

5 Modellbildung

In diesem Kapitel wird ein mathematisches Modell zur Stauplanung auf Grundlage der Zielhierarchie entwickelt. In der Literatur zu theoretischen Stauplanungsverfahren[63] erstellt lediglich Schott[64] ein auf Funktionen basierendes Modell. Durch die Verwendung von sehr vielen Variablen und Indizes ist es jedoch unübersichtlich und für sich anschließende Analysen wenig praktikabel.

Zunächst werden mehrere Prämissen aufgeführt, welche eine Vereinfachung des Problems ermöglichen. Das betrachtete Stauplanungsproblem ist wie in der Praxis zweistufig aufgebaut und besteht aus der Grobplanung und der Feinplanung. Die eingeführten Variablen und Mengen gelten im allgemeinen sowohl für das Grobplanungs-, als auch für das Feinplanungsmodell. Vor der Entwicklung der Modelle, aufbauend auf den operationalen Zielen und der Planungsteilung in der Praxis, erfolgen in einem gesonderten Abschnitt notwendige Vorbereitungen. Aus Gründen der Übersichtlichkeit und der besseren Verständlichkeit schließt eine Zusammenfassung die Modellbildung ab.

5.1 Prämissen

Um das komplexe Problem der Stauplanung für die Modellentwicklung zu vereinfachen, werden die hier aufgeführten und im folgenden näher erläuterten Prämissen angenommen:

1. Sowohl die Schiffsdaten als auch die Containerdaten sind bekannt und können sich während der Stauplanerstellung nicht ändern.
2. Innerhalb einer Range werden keine Container transportiert, d.h. Ursprungshafen und Zielhafen eines Containers dürfen nicht in der selben Range liegen.
3. Das betrachtete Containerschiff wird im Ein-Relationen-Dienst eingesetzt, d.h. betrachtet werden zwei Ranges: eine Ursprungs- und eine Ziel-Range.
4. An Deck steht kein Container über zwei Deckeln.
5. Jeder Stellplatz kann nur einen Container aufnehmen.
6. Das Gewicht der Ladung innerhalb eines Containers ist gleichmäßig verteilt.

---

[63] vgl. Schott89 und Pape/Bohm/Rieger79 sowie Shields84

[64] vgl. Schott89, S. 71 - 104

7. Die Stackanzahl ist ungerade in jeder Bay, und jeder Stack mit der Nummer 0 liegt genau in der Mitte des Schiffes.
8. Übergrößen-Container werden vernachlässigt.
9. Gefahrgut-Container werden vernachlässigt.
10. Interdependenzen mit anderen Plänen der Reederei oder des Terminals werden bis auf die Brückeneinsatzplanung vernachlässigt.

In der Praxis sind die Schiffsdaten immer so lange unveränderlich, bis das Schiff nicht mehr eingesetzt wird bzw. umgebaut wird. Für die Daten der auf ein Schiff zu verstauenden Container gilt dies jedoch nicht, da sich die Aufträge bis kurz vor der Abfahrt des Containerschiffes ändern können. Sie können bei der Stauplanerstellung aber für den Zeitpunkt der Erstellung als festgelegt angesehen werden. Ein Stauplan wird jeweils mit den bekannten Daten erstellt und ist so lange gültig, bis sich diese ändern. Daher kann *Prämisse 1* angenommen werden.

Da die Kosten für den Transport eines Containers per Schiff, im Vergleich zu anderen Transportmitteln, relativ hoch sind, werden in der Praxis innerhalb einer Range in der Regel keine Container mit Containerschiffen transportiert. Diesen Teil der Transportkette übernehmen Feederschiffe, Binnenschiffe, die Bahn oder Lkws. Daraus folgt, daß die Praxis nur selten von *Prämisse 2* abweicht.

Besteht eine Route aus zwei Ranges, so ist in Kombination mit Prämisse 2 garantiert, daß in der jeweiligen Ursprungs-Range sämtliche Stellplätze auf dem Schiff für Zuordnungen zur Verfügung stehen. Ist die Route aus mehr als zwei Ranges zusammengesetzt, enthält das Schiff dagegen in jedem Hafen der Ursprungs-Range Container, bei denen weder Ursprungs- noch Zielhafen in der aktuellen Ursprungs-Range liegen. Ohne *Prämisse 3* ständen also nicht sämtliche Stellplätze zur Verfügung, so daß zu den später formulierten Bedingungen weitere hinzugefügt werden müßten. In der Praxis sind die Ein-Relationen-Dienste außerdem die zur Zeit am weitesten verbreiteten Einsatzgebiete für Containerschiffe.

Für Container mit Zielhafen z_α An Deck, die auf zwei Lukendeckeln stehen, müssen zur Vermeidung von Umstauern beide Luken Unter Deck auf Container mit Zielhafen $z < z_\alpha$ durchsucht werden. Selbst auf Containerschiffen, die in jeder Bay An Deck solche Plazierungen

vorsehen, stehen nur ca. 1/6 aller Container An Deck über zwei Lukendeckeln. Containerschiffe der Reederei Hapag-Lloyd verfügen nur in Ausnahmefällen über wenige Bays, die gegen *Prämisse 4* verstoßen, so daß der Anteil von über zwei Luken stehenden Containern in der Praxis gering ist.

Durch einen platzsparenden Transport von leeren Plattformen und Flats kann ein Stellplatz mit bis zu 8 Containern belegt werden. Für die Modellbildung ist es jedoch hilfreich eine eindeutige Container-Stellplatz-Zuordnung zu fordern. Den „Paketen" von leeren Plattformen oder Flats kann für die Dauer des gemeinsamen Transportes eine zusätzliche Container-Nummer zugewiesen werden, so daß *Prämisse 5* einhaltbar ist.

Durch die Prämissen 6 und 7 wird die näherungsweise durchgeführte Statikberechnung vereinfacht. Die tatsächliche Gewichtsverteilung innerhalb eines Containers ist auch in der Praxis in der Regel nicht bekannt, so daß auch dort mit *Prämisse 6* gearbeitet werden muß. *Prämisse 7* entspricht dem Aufbau der Panamax-Containerschiffe der 5. Generation wie sie z.B. bei Hapag-Lloyd eingesetzt werden. Für Schiffe, die nicht entsprechend Prämisse 7 aufgebaut sind, sondern aus einer geraden Anzahl von Stacks pro Bay bestehen, kann durch geringfügige Änderung weniger Bedingungen ein vergleichbares Modell entwickelt werden.

Auf das Einbeziehen von Übergrößen- und Gefahrgut-Containern wird verzichtet, um die Komplexität des aufzustellenden mathematischen Modells zu verringern. Erweiterungen durch Hinzufügen weiterer Variablen sind jedoch möglich und können in fortführenden Arbeiten vorgenommen werden (Prämisse 8 und 9).

Interdependenzen zu anderen Planungen der Reederei und des Terminals, wie z.B. der Yardplanung, der Leercontainerumlaufplanung sowie der Routenplanung werden gemäß *Prämisse10* ebenfalls vernachlässigt um die Komplexität des Problems zu reduzieren. Diese Zusammenhänge werden aber auch in die Stauplanung der Praxis nicht explizit einbezogen.

5.2 Variablen

Die Abbildung der Stauplanung erfordert folgende Variablen:

c = (u,z,g,n), Container

p = (bb,b,d,l,s,t), Stellplatz

$$X(c,p) = \begin{cases} 1, & \text{falls Container c im Grobplan auf Platz p gestaut wird} \\ 0, & \text{sonst} \end{cases}$$

$$XX(c,p) = \begin{cases} 1, & \text{falls Container c im Feinplan auf Platz p gestaut wird} \\ 0, & \text{sonst} \end{cases}$$

dw(c) = Durchschnittliches Gewicht von Container c für die Grobplanung

w(c) = Gewicht von Container c für die Feinplanung

$w_m(p)$ = Gewicht des im Hafen m auf p gestauten Containers

ws(p) = Maximale Stackgewicht des Stacks in dem Stellplatz p liegt

WG = Maximales Gesamtgewicht der Ladung des Containerschiffes

BM = Bezugsbay für die Trimmberechnung

SBT = Stabilitäts-Toleranz-Gewicht Bug

SHT = Stabilitäts-Toleranz-Gewicht Heck

TT = Trimm-Toleranz-Gewicht

c sei ein zu verstauender 20er Container oder eine Hälfte eines 40er Containers. Diese Variable wird charakterisiert durch das Tupel (u,z,g,n), bestehend aus dem Ursprungshafen u, dem Zielhafen z, der Größe kombiniert mit dem Typ (Standard- oder Thermal - Container) g und einer Nummer n.[65] Eine getrennte Betrachtung von 40er und 20er Containern durch unterschiedliche Variablen ist nicht sinnvoll, da sich auch Zuordnungen verschieden großer Container gegenseitig beeinflussen. Insbesondere ist es in einigen Bays erlaubt, auf zwei nebeneinander stehende 20er Container einen 40er Container zu stauen.

Die Variable p stehe für einen Stellplatz auf dem Containerschiff, bestehend aus dem Tupel (bb,b,d,l,s,t). In Abschnitt 2.2.1 Aufbau wurden fünf Baytypen eingeführt, die hier durch eine Betrachtung von Doppelbays und Bays unterscheidbar sind. Jeder Baytyp entspricht einer Doppelbay, die aus einer Bay für BS20 bzw. aus zwei Bays für alle übrigen Typen zusam-

---

[65] vgl. Schott89, S. 73

mengesetzt ist. Im Tupel steht bb für eine Doppelbay, b für eine Bay, d für ein Deck - entweder der Bereich Unter Deck oder An Deck -, l für eine Luke, s für einen Stack und t für einen Tier.

Die Zuordnungsvariablen X(c,p) und XX(c,p) erhalten genau dann den Wert 1, wenn Container c im Grobplan bzw. im Feinplan auf Stellplatz p gestaut wird, in jedem anderen Fall haben sie den Wert 0.[66] Die Variablen wd(c) und w(c) enthalten für jeden Container das durchschnittliche Gewicht, welches in der Grobplanung berücksichtigt wird bzw. das tatsächliche Gewicht des einzelnen Containers, daß von der Feinplanung benötigt wird. w(p) und ws(p) beinhalten für jeden Stellplatz das Gewicht des im Ursprungshafen m auf Platz p gestauten Containers bzw. das maximale Gewicht des Stacks, in dem der Stellplatz liegt.

Die Variable WG enthält das maximale Gesamtgewicht der Ladung des Containerschiffs und ist somit die obere Grenze für die Gewichtskapazitätsauslastung. Nähere Erklärungen zu den Gewichten sind dem Abschnitt 5.4.3 Gewichte entnehmbar. BM ist die Bezugsbay für die Trimmberechnung. Daher ist BM die Bay, welche sich genau über dem angenommenen Schwerpunkt des Schiffes, also in der Schiffsmitte befindet. Die Toleranzgewichte SBT, SHT und TT entsprechen den Gewichtsdifferenzen bei der Statikberechnung, die durch Ballastwasser ausgleichbar sind.

[66] vgl. Schott89, S. 77

5.3 Mengen

C $= \{(u_0,z_1,g_1,n_1), .. ,(u_M,z_Q,g_4,n_R)\}$,

sei die Menge der in der aktuellen Range zu verstauenden Container. u_M bezeichnet den letzten Hafen der aktuellen Range, z_Q den letzten Hafen der Ziel-Range. g_1 und g_3 stehen für 20er Thermal- bzw. Standard-Container und g_2 und g_4 entsprechen 40er Thermal- bzw. Standard-Containern. n_R ist die Nummer des letzten Containers aus einer Gruppe von Containern mit gleichen Merkmalen für u, z, g. Ein 40er Container entspricht (u_m,z_q,g_2,n_r) und (u_m,z_q,g_2,n_{r+1}) bzw. (u_m,z_q,g_4,n_r) und (u_m,z_q,g_4,n_{r+1}) für n_r ungerade.

P $= \{(bb_1,b_1,d_1,l_1,s_1,t_1), .. ,(bb_H,b_I,d_J,l_K,s_U,t_V)\}$,

sei die Menge der Plätze auf dem Schiff auf die Container gestaut werden können. Dabei ist H die Anzahl der Doppelbays bb, und für I, J, K, U, V gelten für ein Panamax-Containerschiff die Grenzwerte $I, J \leq 2$, $K \leq 3$, $U \leq 13$, $V \leq 8$

B_1 = Menge der Doppelbays, in die 20er Thermal-Container gestaut werden dürfen.
B_2 = Menge der Doppelbays, in die 40er Thermal-Container gestaut werden dürfen.
B_3 = Menge der Doppelbays, in die 20er Container gestaut werden dürfen.
B_4 = Menge der Doppelbays, in die 40er Container gestaut werden dürfen.

Dabei gilt im allgemeinen $B_x \cap B_y \neq \emptyset$, da es in der Regel Bays der Typen B4020 und BG4020 auf den Containerschiffen gibt und weil auf einem Platz, auf den ein Thermal-Container gestaut werden darf, generell auch das Stauen eines Standard-Containers möglich ist.

Normalerweise ist kein leeres Containerschiff zu beladen, sondern ein Schiff welches schon Container geladen hat, deren Zielhäfen in der aktuellen Range liegen. Dies erfordert die Mengen:

F_1 = Menge der Stellplätze, die im Hafen u_1 frei werden
:
F_M = Menge der Stellplätze, die im Hafen u_M frei werden

$U_{11} = \{ c \in C / u = u_1 \wedge g = g_1 \}$ .. $U_{14} = \{ c \in C / u = u_1 \wedge g = g_4 \}$
: :
$U_{M1} = \{ c \in C / u = u_M \wedge g = g_1 \}$ .. $U_{M4} = \{ c \in C / u = u_M \wedge g = g_4 \}$

Dabei gilt: $F_x \cap F_y = \emptyset$, für x, y = 1,..,M mit $x \neq y$

$F_1 \cup .. \cup F_M = P$

$U_{xa} \cap U_{yb} = \emptyset$, für x, y = 1,..,M mit $x \neq y$ oder $a \neq b$

$U_{11} \cup .. \cup U_{M4} = C$

Die Feinplanung muß getrennt für jeden Ursprungshafen durchgeführt werden. Dabei sind die in der Grobplanung vorgesehenen Zuordnungen so einzuhalten, daß für keinen Stellplatz die Daten des Ursprungshafens, Zielhafens und der Größe des zugeordneten Containers im Feinplan verändert werden. Hierfür benötigt die Feinplanung die folgenden Mengen „Container-Gruppen" (CG) sowie „Plätze der Feinplanung" (PF). In der Grobplanung werden die Mengen CG außerdem zur Ermittlung der Durchschnittsgewichte verwendet und entsprechen den in der Lösungsstrategie betrachteten Container-Gruppen.

$CG_{111} = \{ c \in C / u = u_1, z = z_1, g = g_1 \}$.. $CG_{114} = \{ c \in C / u = u_1, z = z_1, g = g_4 \}$

: :

$CG_{1Q1} = \{ c \in C / u = u_1, z = z_Q, g = g_1 \}$.. $CG_{1Q4} = \{ c \in C / u = u_1, z = z_Q, g = g_4 \}$

: :

$CG_{M11} = \{ c \in C / u = u_M, z = z_1, g = g_1 \}$.. $CG_{M14} = \{ c \in C / u = u_M, z = z_1, g = g_4 \}$

: :

$CG_{MQ1} = \{ c \in C / u = u_M, z = z_Q, g = g_1 \}$.. $CG_{MQ4} = \{ c \in C / u = u_M, z = z_Q, g = g_4 \}$

mit $CG_{m,q,r} \cap CG_{mm,qq,rr} = \emptyset$, für $m \neq mm$ oder $q \neq qq$ oder $r \neq rr$

und $CG_{111} \cup .. \cup CG_{MQ4} = C$

$$PF_{mqr} = \{ p \in P / \sum_{c \in CG_{mqr}} X(c,p) = 1 \}$$

mit m = 1, .., M; q = 1, .., Q; r = 1, .., 4

mit $PF_{m,q,r} \cap PF_{mm,qq,rr} = \emptyset$, für $m \neq mm$ oder $q \neq qq$ oder $r \neq rr$

und $PF_{111} \cup .. \cup PF_{MQ4} = P$

5.4 Vorbereitungen

5.4.1 Containermengen

Wichtige Ziele der Stauplanung sind die Maximierung der Stellplatz- sowie der Gewichtskapazitätsauslastung. Die Stellplatzauslastung ist maximal, wenn jedem Element aus P ein Element aus C zugeordnet werden kann. Dabei ist zu berücksichtigen, daß jeder Containertyp und jede Größe Plätze mit speziellen Eigenschaften benötigt. Bevor mit der Zuordnung von Containern zu Stellplätzen begonnen wird, kann bereits durch Vergleichen der Mengen U_{11} .. U_{M4} mit den Mengen F_1 .. F_M unter Berücksichtigung von B_1 .. B_4 festgestellt werden, wieviele Elemente der jeweiligen Menge U_{11} .. U_{M4} auf dem Schiff verstaut werden können und wieviele Plätze nicht mit regulären Containern belegbar sind (Methode und Beweis siehe Abschnitt 6.1.1).

Enthält eine Menge U_{mr} mehr Container, als auf dem Containerschiff aus dieser Menge gestaut werden können, so sind die Container auszuwählen, welche nicht verstaut werden. In der Praxis werden hierzu unterschiedliche Kriterien, von der Bevorzugung bestimmter Kunden bis zum Transport der Container, durch die der größte Gewinn erzielt werden kann, angewendet. In dieser Arbeit wird daher angenommen, daß beliebige Container aus den entsprechenden Mengen entfernt werden. Existieren Plätze, die nicht mit Containern aus C belegt werden können, so kann C mit leicht zu verteilenden Dummy-Containern aufgefüllt werden. Im letzten Hafen der Range sind diejenigen Container am leichtesten zu verstauen, die einen möglichst frühen Zielhafen haben. Daher bekommen die Dummy-Container c_d den Ursprungshafen u_M, Zielhafen z_1 und die Größe g_3 - 20 Fuß Standard-Container - zugeordnet. Ihnen wird jeweils das Gewicht $w(c_d) = 0$ zugewiesen.

Die Gewichtskapazität ist begrenzt durch das maximale Gesamtgewicht WG.

Gilt $$WG < \sum_{c \in C} w(c)$$

so können nicht alle Container auf dem Schiff verladen werden. In diesem Fall müssen Container aus C durch Dummy-Container ersetzt und die Mengen U_{11}, .. , U_{M4} entsprechend geändert werden. Beispielsweise können die schwersten 20er Container aus U_M so lange durch Dummy-Container ersetzt werden bis $WG \geq \sum_{c \in C} w(c)$ gilt.

5.4.2 Umstauer

Nach der Sicherheit und der Kapazitätsauslastung ist das Minimieren der Umstauer das wichtigste Ziel der Stauplanung. In der Grobplanung können drei Typen von Umstauern unterschieden werden. *Alte Umstauer* seien die Container, welche durch den Grobplan der vorangegangenen Range erzeugt wurden und in der aktuellen Range umgestaut werden müssen. *Neue aktuelle Umstauer* seien solche Container, deren Ursprungshafen in der aktuellen Range liegt und die bereits in einem späteren Hafen der aktuellen Range wieder umgestaut werden müssen. Die Container, die in der aktuellen Range so gestaut werden, daß sie in der folgenden Range umgestaut werden müssen, heißen schließlich *neue Umstauer*. Ein Planungsproblem stellen in der aktuellen Range lediglich die alten und die neuen aktuellen Umstauer dar. Die neuen Umstauer müssen erst in der folgenden Range als alte Umstauer erneut betrachtet werden.

Für alte Umstauer muß im Umstauhafen ein zulässiger und möglichst günstiger Platz gefunden werden, so daß der Container in der Range nicht noch einmal umgestaut werden muß und daß durch den neuen Platz möglichst wenige weitere Umstauer entstehen. Im mathematischen Modell wird angenommen, daß die Mengen F_1, .., F_M bereits so verändert wurden, daß die alten Umstauer auf günstige, in der Range wieder frei werdende Plätze verplant wurden.

Neue aktuelle Umstauer können im Umstauhafen eventuell auf Plätze gestaut werden, die für den gesamten Grobplan günstiger sind. Dies würde im mathematischen Modell erfordern, daß entweder ein Container auf zwei Plätze und auf einem Platz zwei Container gestaut sind, was im krassen Gegensatz zu den Bedingungen der Grob- und Feinplanung steht oder, daß diese Umstauer in zwei Container geteilt werden, wobei der erste den tatsächlichen Ursprungshafen und als Zielhafen den Umstauhafen und der zweite den Umstauhafen als Ursprungshafen und den realen Zielhafen erhält. Dieses Vorgehen führt zu einer Änderung der Containermenge während der Laufzeit und verstößt folglich gegen Prämisse 1. Daher ist beim Auftreten von neuen aktuellen Umstauern im Modell zu akzeptieren, daß die einmal geplanten Plätze nach durchgeführtem Umstauen wieder eingenommen werden.

5.4.3 Gewichte

In der Praxis werden für die Grobplanung, statt der in den Auftragspapieren angegebenen Containergewichte, Durchschnittsgewichte für Containergruppen mit gleichem Ursprungshafen, Zielhafen und Größe gebildet. Dieses Vorgehen ist sinnvoll, da die Container erst in der Feinplanung feste Plätze zugeordnet bekommen, in der Grobplanung jedoch bereits näherungsweise die Statik des Schiffes berücksichtigt werden soll. Daher wird auch hier bei den Mengen CG_{111}, .., CG_{MQ4} in der Grobplanung mit Durchschnittsgewichten gearbeitet. Das Durchschnittsgewicht für einen Container der Menge CG_{mqr} ergibt sich aus

$$dw(c) = \Big[\sum_{c_\alpha \in CG_{mqr}} w(c_\alpha) \Big] \, / \, (\text{Anzahl der Elemente von } CG_{mqr}), \text{ für } c \in CG_{mqr}.$$

In der Feinplanung muß in jedem Ursprungshafen m für jeden Stellplatz das Gewicht des ihm in diesem Hafen zugeordneten Containers in die Statikberechnung einbezogen werden. Dies kann entweder ein in der aktuellen Range zu verplanender Container oder ein Container mit Ursprung in der vorangegangenen Range sein. Das zu berücksichtigende Gewicht für einen Stellplatz p erhält man aus

$$w_m(p) = \begin{cases} \sum_{c \in C} w(c) \bullet XX(c,p), & \text{für } p \in F_1 \cup .. \cup F_m \\ w(p), & \text{sonst} \end{cases}$$

mit

w(p) = Gewicht des in der vorherigen Range auf p gestauten Containers.

5.4.4 Statik

Die Anzahl der zu einer exakten Berechnung der fünf Statikkennwerte Stabilität, Trimm, Torsion, Längsfestigkeit und Freibord benötigten Variablen ist sehr groß. Ein weiteres Problem ist, daß sämtliche Werte auch von den Gewichten der Vorräte, Treibstoffe und insbesondere von der Menge des Ballastwassers abhängen. Die Betrachtung der Statik erfolgt hier aber hauptsächlich, um die Menge des benötigten Ballastwassers möglichst zu minimieren. Außerdem werden Statikberechnungen in der Praxis bereits durch Programme ausgeführt, so daß eine exakte Betrachtung sich in der vorliegenden Arbeit erübrigt.

Zur Vereinfachung werden nur der Freibord, die Stabilität und der Trimm explizit betrachtet. Das maximale Gewicht der Ladung WG begrenzt den Freibord. Stabilität und Trimm werden näherungsweise, durch Vergleich der Momente pro Tier in Querrichtung bzw. Längsrichtung bezogen auf die Stacknummer 0 bzw. auf die Bezugsbay BM, durchgeführt. Die Momente ergeben sich aus dem Produkt vom Gewicht des Containers mit seinem Abstand vom jeweiligen Bezugspunkt. Betrachte hierzu Abbildung 20.

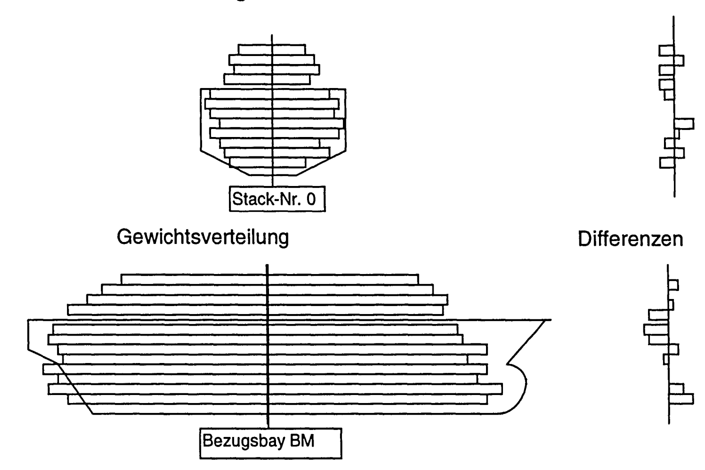


Abb. 20: Momentvergleich

Die Genauigkeit dieser Methode für die Stabilitätskontrolle hängt von der Anzahl der betrachteten Bereiche ab. Es kann das Schiff als ganzes, eingeteilt in die Bereiche Bug und Heck oder differenziert in kleinere Bereiche bis zur Einteilung in Doppelbays betrachtet werden. Wird zumindest eine Einteilung in Bug und Heck gewählt, so kann zusätzlich die Torsion begrenzt werden.

5.4.5 Zusammenfassung

Nach Abschluß dieser Vorbereitungen können sowohl im Grob- als auch im Feinplan jedem Container der geänderten Menge C genau ein Platz und jedem Platz genau ein Container zugeordnet werden. Die Existenz von alten Umstauern ist im Modell ausgeschlossen und neue aktuelle Umstauer erfordern keine Änderungen der Menge C. Für die jeweiligen Statikberechnungen stehen die erforderlichen Gewichte und Methoden zur Verfügung.

5.5 Grobplanung

5.5.1 Problemformulierung

Gegeben ist ein Containerschiff, die zu fahrende Route mit einer Einteilung in zwei Ranges und die aktuelle Range für die der Stauplan erstellt werden soll. Weiterhin gegeben sind die in den Abschnitten 5.2 und 5.3 erläuterten Variablen und Mengen sowie Bedingungen, die für die Zuordnung von einem Container zu einem Stellplatz eingehalten werden müssen, und die Kostenfunktion $KO((c_\alpha,p_\beta),(c_\chi,p_\delta))$ für die Bewertung von Kombinationen von Container-Stellplatz-Zuordnungen. Die Zielfunktion ermittelt schließlich die Gesamtkosten einer Zuordnung von sämtlichen Containern zu Stellplätzen.

Gesucht wird die zulässige Zuordnung von Elementen aus C zu Elementen aus P, welche die Zielfunktion minimiert. Dabei ist eine Zuordnung zulässig, wenn alle Bedingungen erfüllt werden und die Zielfunktion einen Wert $< \infty$ annimmt.

5.5.2 Bedingungen

Um eine zulässige Zuordnung von Containern zu Stellplätzen zu erhalten, ist die Einhaltung folgender Zuordnungsbedingungen zwingend erforderlich.

① $\sum_{p \in P} X(c,p) = 1$; für alle $c \in C$ ② $\sum_{c \in C} X(c,p) = 1$; für alle $p \in P$

Mittels Bedingung ① und ② wird gesichert, daß jeder Container genau einen Platz belegt bzw. das auf einen Platz genau ein Container gestaut wird.

Bedingung ③ verhindert, daß ein Platz, der erst im Hafen u_α frei wird, einem Container mit Ursprungshafen $u < u_\alpha$ zugeordnet wird. Um die Zuordnung von Containern mit bestimmter Größe und Typ zu Plätzen, auf die diese Eigenschaften nicht erlaubt sind auszuschließen, ist Bedingung ④ einzuhalten.

③ $\sum_{\substack{c \in C \\ \text{mit } u < u_\alpha}} X(c,p) = 0$; für alle $p \in F_\alpha$ ④ $\sum_{\substack{c \in C \\ \text{mit } g = g_r}} \Big[\sum_{\substack{p \in P \\ \text{mit } bb \notin B_r}} X(c,p) \Big] = 0$

Eine weitere Restriktion ist durch das maximale Stackgewicht gegeben, welches für keinen Stack überschritten werden darf. Dies fordert Bedingung ⑤.

$$⑤ \quad \sum_{c \in C} \Big[\sum_{\substack{p \in P \\ \text{mit } \tau = 1,..,t_V}} dw(c) \bullet X(c,p) \Big] \leq ws(p), \qquad \text{für alle } p = (bb_h, b_i, d_j, l_k, s_u, \tau) \in P$$

Die Bedingungen ⑥, ⑦ und ⑧ begrenzen die Abweichung von der Stabilität im vorderen und hinteren Schiffsbereich bzw. die Abweichung des Trimms, auf die durch Ballastwasser ausgleichbaren Toleranzwerte. Durch gemeinsames Betrachten der Bedingungen ⑥ und ⑦ statt einer einzigen Bedingung für die Stabilität, wird zusätzlich die Torsion begrenzt.

$$⑥ \quad \Big| \sum_{d_\delta = d_1, d_2} \sum_{t_\beta = t_1,..,t_V} \Big[\sum_{c \in C} \sum_{\substack{p \in P \\ \text{mit } bb_h \leq BM \text{ und } s_\alpha \text{ ungerade und } t = t_\beta \text{ und } d = d_\delta}} (s_\alpha + 1) / 2 \bullet dw(c) \bullet X(c,p) \Big] - \Big[\sum_{c \in C} \sum_{\substack{p \in P \\ \text{mit } bb_h \leq BM \text{ und } s_\alpha \text{ gerade und } t = t_\beta \text{ und } d = d_\delta}} s_\alpha / 2 \bullet w(c) \bullet X(c,p) \Big] \Big| \leq SBT$$

$$⑦ \quad \Big| \sum_{d_\delta = d_1, d_2} \sum_{t_\beta = t_1,..,t_V} \Big[\sum_{c \in C} \sum_{\substack{p \in P \\ \text{mit } bb_h > BM \text{ und } s_\alpha \text{ ungerade und } t = t_\beta \text{ und } d = d_\delta}} (s_\alpha + 1) / 2 \bullet dw(c) \bullet X(c,p) \Big] - \Big[\sum_{c \in C} \sum_{\substack{p \in P \\ \text{mit } bb_h > BM \text{ und } s_\alpha \text{ gerade und } t = t_\beta \text{ und } d = d_\delta}} s_\alpha / 2 \bullet w(c) \bullet X(c,p) \Big] \Big| \leq SHT$$

$$⑧ \quad \Big| \sum_{d_\delta = d_1, d_2} \sum_{t_\beta = t_1,..,t_V} \Big[\sum_{c \in C} \sum_{\substack{p \in P \\ \text{mit } bb_h \leq BM \text{ und } t = t_\beta \text{ und } d = d_\delta}} \big((BM - bb_h) + (1 - b_i)\big) \bullet 6 \bullet dw(c) \bullet X(c,p) \Big] - \Big[\sum_{c \in C} \sum_{\substack{p \in P \\ \text{mit } bb_h > BM \text{ und } t = t_\beta \text{ und } d = d_\delta}} \big((bb_h - BM) + (1 - b_i)\big) \bullet 6 \bullet dw(c) \bullet X(c,p) \Big] \Big| \leq TT$$

5.5.3 Kostenfunktion

Die Kostenfunktion $KO((c_\alpha, p_\beta), (c_\lambda, p_\sigma))$ dient der Bewertung von Kombinationen zweier Container-Stellplatz-Zuordnungen. Dabei werden verbotene Kombinationen mit ∞, äußerst ungünstige mit ZAHL, ungünstige mit 1 und solche, die sich nicht beeinflussen, mit 0 bewer-

tet. Die Größe von ZAHL wird in Abschnitt 6.1.2 Verifizierung so abgeschätzt, daß durch Minimieren der Kostenfunktion die Zielhierarchie eingehalten wird.

$$KO((c_\alpha,p_\beta),(c_\lambda,p_\sigma)) = \begin{cases} \infty \text{ , } (c_\alpha,p_\beta),(c_\lambda,p_\sigma) \text{ ist verboten} \\ \text{ZAHL, } (c_\alpha,p_\beta),(c_\lambda,p_\sigma) \text{ ist äußerst ungünstig} \\ 1 \text{ , } (c_\alpha,p_\beta),(c_\lambda,p_\sigma) \text{ ist ungünstig} \\ 0 \text{ , sonst} \end{cases}$$

Verboten sind Kombinationen die verhindern, daß beide Teile eines 40er Containers zwei nebeneinander liegende Plätze in der Doppelbay einnehmen (Kombination ①). Weiterhin verboten sind Kombinationen, die bewirken, daß ein Container über einem Dummy-Container, d.h. über einem leeren Platz steht (Kombination ②) sowie Kombinationen, bei denen auf einem 40er Container ein oder zwei 20er Container stehen (Kombination ③).

①: $KO((c_\alpha,p_\beta),(c_\lambda,p_\sigma)) = \infty$, für:

$(c_\alpha= (u_m,z_q,g_s,n_r) \wedge p_\beta=(bb_h,b_1,d_j,l_k,s_u,t_v) \wedge c_\lambda\neq(u_m,z_q,g_s,n_{r+1}) \wedge p_\sigma=(bb_h,b_2,d_j,l_k,s_u,t_v)) \vee (c_\alpha= (u_m,z_q,g_s,n_r) \wedge p_\beta=(bb_h,b_1,d_j,l_k,s_u,t_v) \wedge c_\lambda=(u_m,z_q,g_s,n_{r+1}) \wedge p_\sigma\neq(bb_h,b_2,d_j,l_k,s_u,t_v))$ mit c_α , $c_\lambda \in C$, n ungerade und p_β, $p_\sigma \in P$, $bb_h \in B_s$, s = 2, 4

②: $KO((c_\alpha,p_\beta),(c_\lambda,p_\sigma)) = \infty$

für $c_\alpha = (u_m,z_q,g_o,n_r) \wedge p_\beta = (bb_h,b_1,d_j,l_k,s_u,t_v) \wedge c_\lambda = (u_{mm},z_{qq},g_{oo},n_{rr}) \wedge$
$p_\sigma = (bb_h,b_2,d_j,l_k,s_u,t_{v-1})$

mit c_α , $c_\lambda \in C, u_{mm}= u_M$, $w(c_\lambda) = 0$ und p_β, $p_\sigma \in P$

③: $KO((c_\alpha,p_\beta),(c_\lambda,p_\sigma)) = \infty$

für $c_\alpha = (u_m,z_q,g_o,n_r) \wedge p_\beta = (bb_h,b_1,d_j,l_k,s_u,t_v) \wedge c_\lambda = (u_{mm},z_{qq},g_{oo},n_{rr}) \wedge$
$p_\sigma = (bb_h,b_2,d_j,l_k,s_u,t_{v-1})$

mit c_α , $c_\lambda \in C$, $g_o = g_2, g_4$ und $g_{oo} = g_1, g_3$ und p_β, $p_\sigma \in P$

Äußerst ungünstig sind Kombinationen, durch die Umstauer entstehen. Diese Kombinationen sind nicht verboten, da das Maximieren der Stellplatzkapazitätsauslastung eine höhere Priorität in der Zielhierarchie einnimmt als die Vermeidung von Umstauern. Umstauer entstehen einerseits, wenn in einem Stack ein Container mit Zielhafen z_α auf einen Container mit

Zielhafen $z < z_\alpha$ gestaut wird (Kombination ④) oder wenn ein Container über einen Platz gestellt wird, der erst in einem späteren Ursprungshafen der Range frei wird (Kombination ⑤). Andererseits erhält man Umstauer, wenn An Deck ein Container mit Zielhafen z_α auf einem Lukendeckel plaziert wird, unter dem sich ein Container mit Zielhafen $z < z_\alpha$ befindet (Kombination ⑥) oder wenn sich in der Luke ein Platz befindet, der erst in einem späteren Ursprungshafen frei wird (Kombination ⑦). Zur Veranschaulichung der Kombinationen ④ bis ⑦ vgl. die Beispiele in Abbildung 21.

④: $KO((c_\alpha,p_\beta),(c_\lambda,p_\sigma)) = ZAHL$

für $c_\alpha = (u_m,z_q,g_o,n_r) \wedge p_\beta = (bb_h,b_i,d_j,l_k,s_u,t_v) \wedge c_\lambda = (u_{mm},z_{qq},g_{oo},n_{rr}) \wedge$
$p_\sigma = (bb_h,b_i,d_j,l_k,s_u,t_{v-1})$ mit c_α, $c_\lambda \in C$ $z_q > z_{qq}$ und p_β, $p_\sigma \in P$

⑤: $KO((c_\alpha,p_\beta),(c_\lambda,p_\sigma)) = ZAHL$

für $c_\alpha = (u_m,z_q,g_o,n_r) \wedge p_\beta = (bb_h,b_i,d_j,l_k,s_u,t_v) \wedge c_\lambda = (u_{mm},z_{qq},g_{oo},n_{rr}) \wedge$
$p_\sigma = (bb_h,b_i,d_j,l_k,s_u,t_{v-1})$ mit c_α, $c_\lambda \in C$, p_β, $p_\sigma \in P$, mit $p_\sigma \in F_f$ und $u_m < u_f$

⑥: $KO((c_\alpha,p_\beta),(c_\lambda,p_\sigma)) = ZAHL$

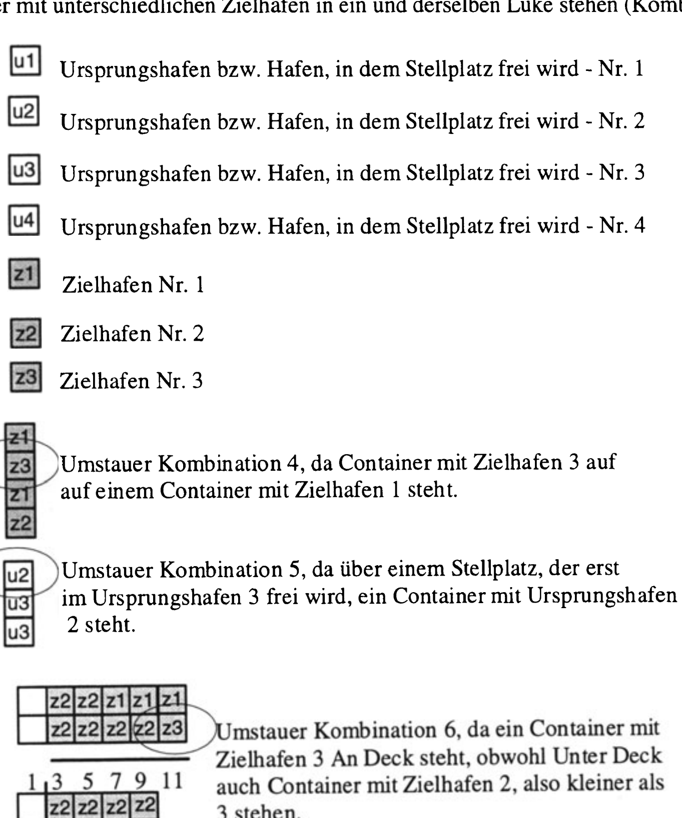
für $c_\alpha = (u_m,z_q,g_o,n_r) \wedge p_\beta = (bb_h,b_i,d_1,l_k,s_u,t_v) \wedge c_\lambda = (u_{mm},z_{qq},g_{oo},n_{rr}) \wedge$
$p_\sigma = (bb_h,b_i,d_2,l_k,s_{uu},t_{vv})$ mit c_α, $c_\lambda \in C$ $z_q > z_{qq}$ und p_β, $p_\sigma \in P$

⑦: $KO((c_\alpha,p_\beta),(c_\lambda,p_\sigma)) = ZAHL$

für $c_\alpha = (u_m,z_q,g_o,n_r) \wedge p_\beta = (bb_h,b_i,d_1,l_k,s_u,t_v) \wedge c_\lambda = (u_{mm},z_{qq},g_{oo},n_{rr}) \wedge$
$p_\sigma = (bb_h,b_i,d_2,l_k,s_{uu},t_{vv})$ mit c_α, $c_\lambda \in C$, p_β, $p_\sigma \in P$, mit $p_\sigma \in F_f$ und $u_m < u_f$

Kombinationen, die Ziele mit niedriger Priorität behindern, sind ungünstig. Dazu gehört erstens das Einhalten von 2 TEU Abstand - dies entspricht einer Doppelbay - beim Stauen eines Zielhafens in verschiedene Bays. Dieses Ziel wird behindert, wenn Container mit dem gleichen Zielhafen in benachbarten Doppelbays stehen (Kombination ⑧). Als zweites ist das Maximieren der Zielhafengruppierung pro Doppelbay zu betrachten. Im Zusammenhang mit diesem Ziel sind alle Kombinationen von Containern mit unterschiedlichen Zielhäfen in derselben Doppelbay ungünstig (Kombination ⑨). Das Ziel maximieren der Zielhafengruppie-

rung pro Luke ist ähnlich zu behandeln. Hier sind die Kombinationen ungünstig, bei denen Container mit unterschiedlichen Zielhäfen in ein und derselben Luke stehen (Kombination ⑩).



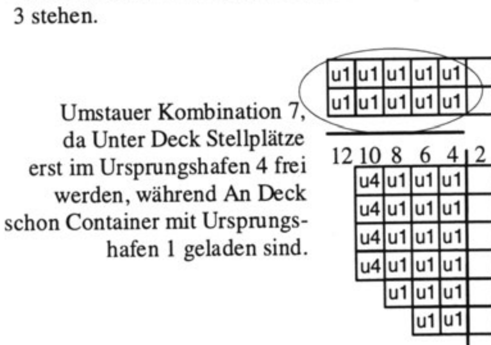


Abb. 21: Umstauer

⑧: $KO((c_\alpha,p_\beta),(c_\lambda,p_\sigma)) = 1$

für $c_\alpha = (u_m,z_q,g_o,n_r) \wedge p_\beta = (bb_h,b_i,d_j,l_k,s_u,t_v) \wedge c_\lambda = (u_{mm},z_q,g_{oo},n_{rr}) \wedge$

$(p_\sigma = (bb_{h+1},b_{ii},d_{jj},l_{kk},s_{uu},t_{vv}) \vee p_\sigma = (bb_{h-1},b_{ii},d_{jj},l_{kk},s_{uu},t_{vv}))$

mit c_α , $c_\lambda \in C$ und p_β, $p_\sigma \in P$

⑨: $KO((c_\alpha,p_\beta),(c_\lambda,p_\sigma)) = 1$

für $c_\alpha = (u_m,z_q,g_o,n_r) \wedge p_\beta = (bb_h,b_i,d_j,l_k,s_u,t_v) \wedge c_\lambda = (u_{mm},z_{qq},g_{oo},n_{rr}) \wedge$

$p_\sigma = (bb_h,b_{ii},d_{jj},l_{kk},s_{uu},t_{vv})$, mit c_α, $c_\lambda \in C$ $z_q \neq z_{qq}$ und p_β, $p_\sigma \in P$

⑩: $KO((c_\alpha,p_\beta),(c_\lambda,p_\sigma)) = 1$

für $c_\alpha = (u_m,z_q,g_o,n_r) \wedge p_\beta = (bb_h,b_i,d_j,l_k,s_u,t_v) \wedge c_\lambda = (u_{mm},z_{qq},g_{oo},n_{rr}) \wedge$

$p_\sigma = (bb_h,b_{ii},d_j,l_k,s_{uu},t_{vv})$, mit c_α, $c_\lambda \in C$ $z_q \neq z_{qq}$ und p_β, $p_\sigma \in P$

5.5.4 Zielfunktion

Die Funktion Z(C,P) berechnet für die Zuordnung sämtlicher Container zu Plätzen die, durch die enthaltenen Container-Stellplatz-Kombinationen entstehenden Kosten.

$$Z(C,P) := \sum_{\substack{c_\alpha,c_\lambda \in C \\ c_\alpha \neq c_\lambda}} \sum_{\substack{p_\beta,\, p_\sigma \in P \\ p_\beta \neq p_\sigma}} KO((c_\alpha,p_\beta),(c_\lambda,p_\sigma)) \bullet X(c_\alpha, p_\beta) \bullet X(c_\lambda,p_\sigma)$$

Durch Minimieren der Zielfunktion Z(C,P) erhält man, falls min Z(C,P) < ∞, die günstigste Zuordnung und falls min Z(C,P) = ∞, die Aussage, daß keine zulässige Zuordnung existiert.

5.6 Feinplanung

5.6.1 Problemformulierung

Gegeben ist die in der Grobplanung ermittelte zulässige Zuordnung der Elemente aus C zu den Elementen aus P mit dem minimalen Zielfunktionswert. Dabei sind insbesondere die Mengen $CG_{111}, .., CG_{MQ4}$ und $PF_{111}, .., PF_{MQ4}$ bekannt.

Gesucht sind für jeden Ursprungshafen u_m mit m = 1, .., M der aktuellen Range die zulässigen Zuordnungen der Mengen CG_{m11} zu PF_{m11} bis CG_{mQ4} zu PF_{mQ4}, welche jeweils die Zielfunktionen der Feinplanung minimieren.

5.6.2 Bedingungen

Um für jeden Hafen u_m mit m = 1, .., M der aktuellen Range einen zulässigen Feinplan zu erhalten, müssen folgende Bedingungen eingehalten werden.

Der einem Container c im Feinplan zugeordnete Stellplatz muß zu der Menge von Stellplätzen gehören, denen im Grobplan ein Container mit dem gleichen Ursprungs- und Zielhafen und der gleichen Größe zugeordnet wurde. Damit einem Stellplatz auch im Feinplan genau ein Container und umgekehrt einem Container genau ein Stellplatz zugeordnet wird, sind die Bedingungen ① und ② erforderlich.

① $\sum_{p \in PF_{mqr}} XX(c,p) = 1$; für alle $c \in CG_{mqr}$ mit q=1,..,Q; r=1,..,4

② $\sum_{c \in CG_{mqr}} XX(c,p) = 1$; für alle $p \in PF_{mqr}$ mit q=1,..,Q; r=1,..,4

Auch in der Feinplanung muß das Einhalten der maximalen Stackgewichte gewährleistet werden. Da sich der Feinplan jeweils auf einen Ursprungshafen der Range beschränkt, müssen die Gewichte der in der vorherigen Range geladenen und im aktuellen Ursprungshafen noch nicht gelöschten Container zusätzlich berücksichtigt werden. Dies sichert Bedingung ③.

③ $\sum_{\tau = 1,..,t_V} w_m(bb_h,b_i,d_j,l_k,s_u,\tau)$ für alle $p = (bb_h,b_i,d_j,l_k,s_u,\tau) \in P$

$$= \sum_{c \in C} \Big[\sum_{\tau = 1,..,t_V} w(c) \bullet XX(c,(bb_h,b_i,d_j,l_k,s_u,\tau)) \Big] + \sum_{p \in F_{m+1} \cup .. \cup F_M} w(p) \le ws(p),$$

5.6.3 Zielfunktionen

In jedem Hafen u_m soll die Ladung im durch den Grobplan vorgegebenen Rahmen so auf das Schiff gestaut werden, daß möglichst wenig Ballastwasser zum Stabilitäts- und Trimmausgleich benötigt wird. Da die Feinplanung nicht mit durchschnittlichen sondern mit angegebenen Gewichten arbeitet, ist es sinnvoll, für die Stabilitätskontrolle feinere Bereiche als in der Grobplanung zu verwenden. Hier wird daher eine Einteilung in Doppelbays verwendet.

ZS_1 .. ZS_H enthalten für jede Doppelbay bb_h, mit h = 1, .., H die Momentenabweichung zwischen der Backbord- und der Steuerbordseite des Containerschiffes. ZT beinhaltet die Abweichung der Momente zwischen Bug und Heck. Die benötigte Menge des Ballastwassers ist minimal, wenn gleichzeitig min ZS_1 , .., min ZS_H und min Z_T angenommen werden.

$$ZS_1 = \sum_{\delta=d_1,d_2} \Big[\sum_{\tau=t_1..t_V} \Big| \sum_{bb_h = bb_1 \text{ und } s_u \text{ ungerade}} (s_u+1)/2 \bullet w_m(bb_h,b_i,\delta,l_k,s_u,\tau) - \sum_{bb_h = bb_1 \text{ und } s_u \text{ gerade}} s_u/2 \bullet w_m(bb_h,b_i,\delta,l_k,s_u,\tau) \Big| \Big]$$

$$\vdots$$

$$ZS_H = \sum_{\delta=d_1,d_2} \Big[\sum_{\tau=t_1..t_V} \Big| \sum_{bb_h = bb_H \text{ und } s_u \text{ ungerade}} (s_u+1)/2 \bullet w_m(bb_h,b_i,\delta,l_k,s_u,\tau) - \sum_{bb_h = bb_H \text{ und } s_u \text{ gerade}} s_u/2 \bullet w_m(bb_h,b_i,\delta,l_k,s_u,\tau) \Big| \Big]$$

$$ZT = \sum_{\delta=d_1,d_2} \Big[\sum_{\tau=t_1,..t_V} \Big| \sum_{bb_h \leq BM} \big((BM - bb_h)+(1 - b_i)\big) \bullet 6 \bullet w_m(bb_h,b_i,\delta,l_k,s_u,\tau) - \sum_{bb_h > BM} \big((bb_h - BM) + (1 - b_i)\big) \bullet 6 \bullet w_m(bb_h,b_i,\delta,l_k,s_u,\tau) \Big| \Big]$$

Wobei gilt:

$$w_m(p) = \begin{cases} \sum_{c \in C} w(c) \bullet XX(c,p), & \text{für } p \in F_1 \cup .. \cup F_m \\ w(p), & \text{sonst} \end{cases}$$

mit $w(p)$ = Gewicht des in der vorherigen Range auf p gestauten Containers.

5.7 Zusammenfassung

5.7.1 Grobplanungsproblem

$$\min \sum_{\substack{c_\alpha, c_\lambda \in C \\ c_\alpha \neq c_\lambda}} \sum_{\substack{p_\beta, p_\sigma \in P \\ p_\beta \neq p_\sigma}} KO((c_\alpha, p_\beta),(c_\lambda, p_\sigma)) \bullet X(c_\alpha, p_\beta) \bullet X(c_\lambda, p_\sigma)$$

unter

① $\sum_{p \in P} X(c,p) = 1$; für alle $c \in C$

② $\sum_{c \in C} X(c,p) = 1$; für alle $p \in P$

③ $\sum_{\substack{c \in C \\ \text{mit } u < u_\alpha}} X(c,p) = 0$; für alle $p \in F_\alpha$

④ $\sum_{\substack{c \in C \\ \text{mit } g = g_r}} \left[\sum_{\substack{p \in P \\ \text{mit } bb \notin B_r}} X(c,p) \right] = 0$

⑤ $\sum_{c \in C} \left[\sum_{\substack{p \in P \\ \text{mit } \tau = 1,..,t_V}} dw(c) \bullet X(c,p) \right] \leq ws(p),$ für alle $p = (bb,b,d,l,s,\tau) \in P$

⑥ $\left| \sum_{d_\delta = d_1, d_2} \sum_{t_\beta = t_1,..,t_V} \left[\sum_{c \in C} \sum_{p \in P} (s_\alpha+1)/2 \bullet dw(c) \bullet X(c,p) \right] - \right.$

mit $bb_h \leq BM$, $s = s_\alpha$ ungerade und $t = t_\beta$ und $d = d_\delta$

$\left. \left[\sum_{c \in C} \sum_{p \in P} s_\alpha/2 \bullet w(c) \bullet X(c,p) \right] \right| \leq SBT$

mit $bb_h \leq BM$ und s_α gerade und $t = t_\beta$ und $d = d_\delta$

⑦ $\left| \sum_{d_\delta = d_1, d_2} \sum_{t_\beta = t_1,..,t_V} \left[\sum_{c \in C} \sum_{p \in P} (s_\alpha+1)/2 \bullet dw(c) \bullet X(c,p) \right] - \right.$

mit $bb_h > BM$, $s = s_\alpha$ ungerade und $t = t_\beta$ und $d = d_\delta$

$\left. \left[\sum_{c \in C} \sum_{p \in P} s_\alpha/2 \bullet w(c) \bullet X(c,p) \right] \right| \leq SHT$

mit $bb_h > BM$, $s = s_\alpha$ gerade und $t = t_\beta$ und $d = d_\delta$

⑧ $\left| \sum_{d_\delta = d_1, d_2} \sum_{t_\beta = t_1,..,t_V} \left[\sum_{c \in C} \sum_{p \in P} ((BM - bb_h) + (1 - b_i)) \bullet 6 \bullet dw(c) \bullet X(c,p) \right] \right.$

mit $bb_h \leq BM$ und $t = t_\beta$ und $d = d_\delta$

$\left. - \left[\sum_{c \in C} \sum_{p \in P} ((bb_h - BM) + (1 - b_i)) \bullet 6 \bullet dw(c) \bullet X(c,p) \right] \right| \leq TT$

mit $bb_h > BM$ und $t = t_\beta$ und $d = d_\delta$

mit $c = (u,z,g,n)$ und $p = (bb,b,d,l,s,t)$

$$X(c,p) = \begin{cases} 1, & \text{falls Container } c \text{ im Grobplan auf Platz } p \text{ gestaut wird} \\ 0, & \text{sonst} \end{cases}$$

$$KO((c_\alpha,p_\beta),(c_\lambda,p_\sigma)) = \begin{cases} \infty\text{ , } (c_\alpha,p_\beta),(c_\lambda,p_\sigma) \text{ ist verboten} \\ \text{ZAHL, } (c_\alpha,p_\beta),(c_\lambda,p_\sigma) \text{ ist äußerst ungünstig} \\ 1\text{ , } (c_\alpha,p_\beta),(c_\lambda,p_\sigma) \text{ ist ungünstig} \\ 0\text{ , sonst} \end{cases}$$

5.7.2 Feinplanungsproblem

$$Z_1 = \min \sum_{\delta=d_1,d_2} \Big[\sum_{\tau=t_1..t_V} \Big| \sum_{bb_h = bb_1 \text{ und } s_u \text{ ungerade}} (s_u+1)/2 \bullet w_m(bb_h,b_i,\delta,l_k,s_u,\tau) - \sum_{bb_h = bb_1 \text{ und } s_u \text{ gerade}} s_u/2 \bullet w_m(bb_h,b_i,\delta,l_k,s_u,\tau) \Big| \Big]$$

$\vdots$

$$Z_H = \min \sum_{\delta=d_1,d_2} \Big[\sum_{\tau=t_1..t_V} \Big| \sum_{bb_h = bb_H \text{ und } s_u \text{ ungerade}} (s_u+1)/2 \bullet w_m(bb_h,b_i,\delta,l_k,s_u,\tau) - \sum_{bb_h = bb_H \text{ und } s_u \text{ gerade}} s_u/2 \bullet w_m(bb_h,b_i,\delta,l_k,s_u,\tau) \Big| \Big]$$

$$Z_T = \min \sum_{\delta=d_1,d_2} \Big[\sum_{\tau=t_1,..t_V} \Big| \sum_{bb_h \le BM} \big((BM-bb_h)+(1-b_i) \big) \bullet 6 \bullet w_m(bb_h,b_i,\delta,l_k,s_u,\tau) - \sum_{bb_h > BM} \big((bb_h-BM)+(1-b_i) \big) \bullet 6 \bullet w_m(bb_h,b_i,\delta,l_k,s_u,\tau) \Big| \Big]$$

unter

① $\sum_{p \in PF_{mqr}} XX(c,p) = 1$; für alle $c \in CG_{mqr}$ mit $q=1,..,Q$; $r=1,..,4$

② $\sum_{c \in CG_{mqr}} XX(c,p) = 1$; für alle $p \in PF_{mqr}$ mit $q=1,..,Q$; $r=1,..,4$

③ $\sum_{\tau = 1,..,t_V} w_m(bb_h,b_i,d_j,l_k,s_u,\tau) \le ws(p)$ für alle $p = (bb_h,b_i,d_j,l_k,s_u,\tau) \in P$

$$\Leftrightarrow \sum_{c \in C} \Big[\sum_{\tau = 1,..,t_V} w(c) \bullet XX(c,(bb_h,b_i,d_j,l_k,s_u,\tau)) \Big] + \sum_{p \in F_{m+1} \cup .. \cup F_M} w(p) \le ws(p),$$

mit

$$XX(c,p) = \begin{cases} 1\text{ , falls Container c im Feinplan auf Platz p gestaut wird} \\ 0\text{ , sonst} \end{cases}$$

$$w_m(p) = \begin{cases} \sum_{c \in C} w(c) \bullet XX(c,p), & \text{für } p \in F_1 \cup .. \cup F_m \\ w(p), & \text{sonst} \end{cases}$$

mit $w(p)$ = Gewicht des in der vorherigen Range auf p gestauten Containers

6 Modellanalyse

Dieses Kapitel enthält neben der Verifizierung der in Kapitel 5 aufgestellten Behauptungen eine kurze Einführung in die wichtigsten Begriffe der Komplexitätstheorie, eine Übersicht von verwandten kombinatorischen Optimierungsproblemen, insbesondere dem quadratischen Assignment Problem mit einem Überblick über bereits entwickelte exakte und heuristische Algorithmen zur Problemlösung, sowie eine Lösungsstrategie für das Grobplanungsproblem.

6.1 Verifizierung

6.1.1 Containermengen

Behauptung 1:

Bevor mit der Zuordnung von Container zu Stellplätzen begonnen wird, kann durch Vergleichen von Mengen festgestellt werden, wieviele Elemente der jeweiligen Container-Menge auf das Schiff gestaut werden können und wieviele Plätze nicht mit Containern belegbar sind.

Beweis:

u_{mr} und f_{mr} seien die Anzahl der Container mit Ursprungshafen m und Typ r bzw. der Stellplätze, die im Hafen m frei werden und auf die Container vom Typ r gestaut werden dürfen („#" bedeutet Anzahl der Elemente einer Menge):

$u_{11} = \# U_{11}$ .. $u_{14} = \# U_{14}$ $\quad$ $f_{11} = \# (F_1 \cap B_1)$ .. $f_{14} = \# (F_1 \cap B_4)$

: $\quad$: $\quad$: $\quad$:

$u_{M1} = \# U_{M1}$ .. $u_{M4} = \# U_{M4}$ $\quad$ $f_{M1} = \# (F_M \cap B_1)$ .. $f_{M4} = \# (F_M \cap B_4)$

ft_m und ff_m sei die Anzahl der Stellplätze auf die 40er oder 20er Thermal- bzw. Standard-Container gestaut werden dürfen.

$ft_1 = \# (F_1 \cap B_1 \cap B_2)$ $\quad$ $ff_1 = \# (F_1 \cap B_3 \cap B_4)$

: $\quad$:

$ft_M = \# (F_M \cap B_1 \cap B_2)$ $\quad$ $ff_M = \# (F_M \cap B_3 \cap B_4)$

s_{mr} = Anzahl der Container vom Typ r, die im Hafen m auf einen Stellplatz gestaut werden müssen, auf dem 40er oder 20er Container erlaubt sind.

k_{mr} = Anzahl der Stellplätze auf die Container vom Typ r gestaut werden dürfen und die im Hafen m noch nicht benötigt werden; mit $k_{0r} := 0$.

Hilfssatz:

Durch die Vorschriften a) bis c) werden s_{mr} und k_{mr} richtig gesetzt für r = 3, 4 (für r = 1, 2 mit ft_m statt ff_m analog).

a)Mehr Plätze als Container	b) Mehr Container als Plätze	c) Gleichgewicht
$u_{mr} < f_{mr} - ff_m + k_{m-1,r}$	$u_{mr} > f_{mr} - ff_m + k_{m-1,r}$	$u_{mr} = f_{mr} - ff_m + k_{m-1,r}$
$k_{mr} := (f_{mr} - ff_m + k_{m-1,r}) - u_{mr}$	$k_{mr} := 0$	$k_{mr} := 0$
$s_{mr} := 0$	$s_{mr} := u_{mr} - (f_{mr} - ff_m + k_{m-1,r})$	$s_{mr} := 0$

Tabelle 11: Container-Stellplatz-Verhältnis zählen

Beweis durch vollständige Induktion über m:

Induktions-Anfang: m = 1

$u_{1r} = f_{1r} - ff_1 + k_{0r} = f_{1r} - ff_1$ bedeutet: Es stehen genauso viele Plätze zur Verfügung, auf die nur Container vom Typ r gestaut werden dürfen, wie benötigt werden.

Falls $u_{1r} < f_{1r} - ff_1 \Rightarrow k_{1r} = f_{1r} - ff_1 - u_{1r}$ √

Falls $u_{1r} > f_{1r} - ff_1 \Rightarrow s_{1r} = u_{1r} - (f_{1r} - ff_1)$ √

Induktionsschritt:

Annahme a) - c) sind korrekt für $m = \mu - 1$. Zu zeigen: sie sind auch korrekt für $m = \mu$

Da a) für $m = \mu$-1 korrekt ist, enthält $k_{\mu-1,r}$ die Anzahl der Stellplätze, die im Hafen μ - 1 vom Typ r noch nicht benötigt wurden und daher im Hafen $m = \mu$ noch zur Verfügung stehen.

$u_{\mu r} = f_{\mu r} - ff_\mu + k_{\mu-1,r}$ gilt dann, wenn inklusive der noch nicht benötigten Plätze genauso viele Plätze zur Verfügung stehen, wie vom Typ r benötigt werden.

Falls $u_{\mu r} < f_{\mu r} - ff_\mu + k_{\mu-1,r}. \Rightarrow k_{\mu r} := (f_{\mu r} - ff_\mu + k_{\mu-1,r}) - u_{\mu r}$ √

Falls $u_{\mu r} > f_{\mu r} - ff_\mu + k_{\mu-1,r}. \Rightarrow s_{\mu r} := u_{\mu r} - (f_{\mu r} - ff_\mu + k_{\mu-1,r})$ √

Gelten

$s_{m1} + s_{m2} \leq \sum_{\mu = 1 .. m} (ft_\mu - (s_{\mu-1,1} + s_{\mu-1,2}))$ und $s_{M1} + s_{M2} \leq \sum_{\mu = 1 .. M} (ft_\mu - (s_{\mu-1,1} + s_{\mu-1,2}))$

$s_{m3} + s_{m4} \leq \sum_{\mu = 1 .. m} (ff_\mu - (s_{\mu-1,3} + s_{\mu-1,4}))$ $s_{M3} + s_{M4} \leq \sum_{\mu = 1 .. m} (ff_\mu - (s_{\mu-1,3} + s_{\mu-1,4}))$

für m = 1, .., M-1

so kann jeder Container auf einen Stellplatz gestaut werden und kein Platz bleibt frei.

Falls $s_{m\rho} + s_{m\rho+1} > \sum_{\mu = 1 .. m} (ff_\mu - (s_{\mu-1,\rho} + s_{\mu-1,\rho+1})$

existieren mehr Container mit Ursprungshafen m als verstaut werden können.

Überschüssige-Container$_m$ $= s_{m\rho} + s_{m\rho+1} - \sum_{\mu = 1 .. m} (ff_\mu - (s_{\mu-1,\rho} + s_{\mu-1,\rho+1}))$

Falls $s_{M\rho} + s_{M\rho+1} < \sum_{\mu = 1 .. M} (ff_\mu - (s_{\mu-1,\rho} + s_{\mu-1,\rho+1}))$ oder $k_{Mr} > 0$ bleiben einige Plätze frei.

Freie-Plätze$_M$ $= k_{Mr} + \sum_{\mu = 1 .. M} (ff_\mu - (s_{\mu-1,\rho} + s_{\mu-1,\rho+1})) - (s_{M\rho} + s_{M\rho+1})$

Durch Entfernen von überschüssigen Containern aus der Container-Menge bzw. Auffüllen der Container-Menge mit Dummy-Containern zur Belegung der freien Plätze, kann garantiert werden, daß theoretisch jedem Container ein Stellplatz zugeordnet werden kann und umgekehrt. Trotzdem ist es möglich, daß keine zulässige Zuordnung existiert, da die einzuhaltenden Bedingungen für das maximale Stackgewicht sowie für die Statiktoleranzwerte nicht in das Zählverfahren integriert sind.

6.1.2 Zielhierarchie

Behauptung 2:

Wenn Zahl = 4 • H • J • K • U • V • Q + 2 • H • J • (K • U • V)², wird die Reihenfolge der Ziele Umstauer minimieren (Ziele F und G) und der Stauziele (Ziele C bis E) in der Grobplanung gemäß 3.3 Zielhierarchie eingehalten.

Beweis:

Seien: H Anzahl der Doppelbays; U max. Anzahl der Stacks pro Luke

J max. Anzahl der Decks; V max. Anzahl der Tiers pro Stack

K max. Anzahl der Luken pro Doppelbay; Q Anzahl der Zielhäfen

Das Ziel Umstauer vermeiden hat höhere Priorität als die Ziele:

(1) Zielhafengruppierung pro Bay maximieren

(2) Zielhafengruppierung pro Luke maximieren

(3) 2 TEU Abstand beim Stauen von Containern mit gleichem Zielhafen einhalten

Zu (1): Der größte Wert für die Zielfunktion tritt auf, wenn in jeder Doppelbay Container mit sämtlichen Zielhäfen der Range vertreten sind.

$\text{Wert}_{1,\ \text{Doppelbay}} = 2 \bullet (\text{Anzahl der Plätze}_1 - 1) \bullet (\text{Anzahl der Zielhäfen} - 1)$

mit: $\text{Anzahl der Plätze}_1 \leq K \bullet U \bullet V$

Anzahl der Zielhäfen = Q

$\Rightarrow \text{Wert}_{1,\ \text{Doppelbay}} \leq 2 \bullet (K \bullet U \bullet V - 1) \bullet (Q - 1)$

$\Rightarrow \text{Wert}_{1,\ \text{Schiff}} \leq H \bullet J \bullet [2 \bullet (K \bullet U \bullet V - 1) \bullet (Q - 1)]$

$\leq 2 \bullet H \bullet J \bullet K \bullet U \bullet V \bullet Q$ da $(a-1) \bullet (b-1) \leq a \bullet b$, für $a, b \geq 1$

Zu (2): Der größte Wert für die Zielfunktion tritt auf, wenn in jeder Luke Container mit sämtlichen Zielhäfen der Range vertreten sind.

$\text{Wert}_{2,\ \text{pro Luke}} = 2 \bullet (\text{Anzahl der Plätze}_2 - 1) \bullet (\text{Anzahl der Zielhäfen} -1)$

mit: $\text{Anzahl der Plätze}_2 \leq U \bullet V$

$\Rightarrow \text{Wert}_{2,\ \text{pro Luke}} \leq 2 \bullet (U \bullet V - 1) \bullet (Q - 1)$

$\Rightarrow \text{Wert}_{2,\ \text{Schiff}} \leq H \bullet J \bullet K \bullet [2 \bullet (U \bullet V - 1) \bullet (Q - 1)]$

$\leq 2 \bullet H \bullet J \bullet K \bullet U \bullet V \bullet Q$ da $(a-1) \bullet (b-1) \leq a \bullet b$, für $a, b \geq 1$

Zu (3): Der größte Wert für die Zielfunktion tritt auf, wenn in jeder Bay Container mit gleichem Zielhafen enthalten sind.

$\text{Wert}_{3,\ \text{pro Doppelbay}} = 2 \bullet (\text{Anzahl der Plätze}_3 - 1)^2$

mit: $\text{Anzahl der Plätze}_3 \leq K \bullet U \bullet V$

$\Rightarrow \text{Wert}_{3,\ \text{pro Bay}} \leq 2 \bullet (I \bullet K \bullet U \bullet V - 1)^2$

$\Rightarrow \text{Wert}_{3,\ \text{Schiff}} \leq H \bullet J \bullet [2 \bullet (K \bullet U \bullet V - 1)^2]$

$\leq 2 \bullet H \bullet J \bullet K^2 \bullet U^2 \bullet V^2$ da $(a-1)^2 \leq a^2$, für $a \geq 1$

Damit das Ziel Umstauer vermeiden eine höhere Priorität als die Ziele (1) bis (3) zusammen erhält, müssen die Werte addiert werden.

$\Rightarrow$ Zahl = $Wert_{1,\,Schiff} + Wert_{2,\,Schiff} + Wert_{3,\,Schiff}$

$\leq 4 \bullet H \bullet J \bullet K \bullet U \bullet V \bullet Q + 2 \bullet H \bullet J \bullet K^2 \bullet U^2 \bullet V^2$

6.2 Komplexitätstheorie

Zur Analyse der Komplexität eines Algorithmus wird die Anzahl der elementaren Schritte gezählt, welche dieser zur Problemlösung benötigt. Elementare Schritte sind arithmetische Operationen, Vergleiche, Zuweisungen und ähnliches. Dabei wird angenommen, daß der Prozessor für jede dieser Operationen die gleiche Zeit benötigt.[67]

Da in der Regel das Verhalten eines Algorithmus bei sehr großem Input n untersucht wird, ist es in der Regel ausreichend, die Anzahl der benötigten Operationen nach oben abzuschätzen. Seien f(n) und g(n) Funktionen mit f und g: $\mathbb{N}^+ \rightarrow \mathbb{R}^+$, dann gilt f(n) = O(g(n)), falls ein konstantes c > 0 existiert, so daß für genügend große n (n ≥ N) gilt: f(n) ≤ cg(n).[68] Benötigt ein Algorithmus beispielsweise $4n^3 + 6n^2 + 4$ Operationen, so beträgt dessen Komplexität: $O(n^3)$.

Ein Algorithmus ist effizient, wenn seine Komplexität polynomial mit der Größe des Inputs wächst, z.B. Algorithmen mit O(n) oder $O(n^3)$.[69] Probleme, für die es solche Algorithmen gibt, gehören zu der Klasse *P* (polynomial). Allgemein wird die Klasse P als Menge der Ja-Nein Probleme definiert, für die für ein beliebiges Input in polynomialer Zeit festgestellt werden kann, ob die Antwort ja oder nein lautet.[70]

Die Klassen *NP* (non-deterministic polynomial) und *CoNP* enthalten Probleme, die zwar relativ einfach zu verifizieren, aber nicht unbedingt einfach zu lösen sind.[71] Ein Problem gehört zur Klasse NP, wenn es als Ja-Nein Problem formuliert werden kann und wenn in polynomia-

[67] vgl. Papadimitriou/Steiglitz82, S. 158

[68] vgl. a.a.O., S. 159

[69] vgl. a.a.O., S. 164

[70] vgl. Parker/Rardin88, S. 24

[71] vgl. a.a.O., S. 25

ler Zeit verifizierbar ist, daß die Antwort für ein Input Ja ist.[72] Dagegen gehört ein Ja-Nein Problem zur Klasse CoNP, wenn in polynomialer Zeit für jedes Input nachweisbar ist, daß die Antwort Nein lautet. Hieraus folgt, daß auch jedes Problem aus P in NP und in CoNP liegt; also gilt $P \subseteq NP$ und $P \subseteq CoNP$.

Besonders schwer zu lösende Probleme enthält die Klasse *NPC*, der NP-vollständigen Probleme, welche folgende Eigenschaften hat[73]:

❍ Wenn irgendein NP-vollständiges Problem mit einem polynomialen Algorithmus lösbar ist, dann gibt es für jedes NP-vollständige Problem polynomiale Lösungen.

Da es bisher nicht gelungen ist, ein Problem der Klasse NPC polynomial zu lösen, ist nicht bekannt, ob $NP = P$ gilt; aber auch $NP \neq P$ konnte bislang weder bewiesen noch widerlegt werden.

Sei F* der optimale Lösungwert und F' der approximierte Lösungswert eines Problems mit $F^*>0$. Ein Algorithmus heißt *ε-approximierender* Algorithmus für ein Problem P, wenn entweder ① oder ② gilt.

① P ist ein Maximierungsproblem für jede Instanz von P und $|(F^*-F')/F^*| \leq \varepsilon$, $0< \varepsilon <1$

② P ist ein Minimierungsproblem für jede Instanz von P und $|(F^*-F')/F^*| \leq \varepsilon$, $\varepsilon > 0$[74]

Probleme der Klasse NPC, für die es keinen polynomialen ε-approximierenden Algorithmus gibt, sind besonders schwer zu lösende NP-vollständige Probleme.[75]

Abbildung 22[76] zeigt einen Überblick der hier wichtigen Zusammenhänge der Klassen P, NP, CoNP und NPC.

[72] vgl. Nemhauser/Wolsey88, S. 129, vgl. Papadimitriou/Steiglitz82, S. 347, vgl. auch Parker/Rardin88, S. 25

[73] vgl. Papadimitriou/Steiglitz82, S. 343, vgl. auch Nemhauser/Wolsey88, S. 131

[74] vgl. Sahni/Gonzalez76, S. 555/556

[75] vgl. Sahni/Gonzalez76, S. 562, vgl. weiter Burkard/Karisch/Rendl91, S. 116

[76] vgl. Nemhauser/Wolsey88, S. 138

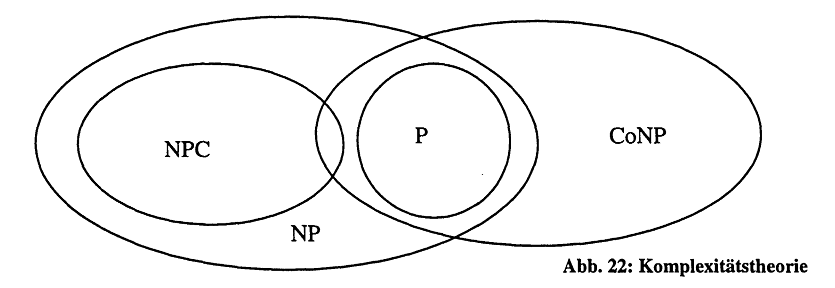


Abb. 22: Komplexitätstheorie

6.3 Verwandte kombinatorische Optimierungsprobleme

Sowohl das Grobplanungsproblem als auch das Feinplanungsproblem basieren auf den endlichen Mengen C und P, zwischen denen die zulässige Zuordnung gesucht ist, welche die jeweilige Zielfunktion minimiert. Da es sich im Bezug auf die gewählte Zielsetzung um die Suche der, optimalen Alternative aus einer Reihe von möglichen Alternativen handelt, gehören beide Probleme zu der *Klasse der Optimierungsprobleme.*[77]

Ein konkretes Optimierungsproblem ist definiert als ein Paar (F,c), bestehend aus der Menge F der zulässigen Punkte und der Kostenfunktion c: $F \rightarrow \mathbb{R}^2$. Das Ziel ist, ein $f \in F$ zu finden, für das $c(f) \leq c(y)$ für alle $y \in F$. Eine Klasse von Optimierungsproblemen besteht aus einer Menge von konkreten Problemen (Instanzen). Da sowohl im Grob- als auch im Feinplanungsmodell jeweils nur endlich viele Zuordnungsvariablen existieren, handelt es sich um *diskrete Optimierungsprobleme*[78] oder, anders ausgedrückt, um *kombinatorische Optimierungsprobleme.*

---

[77] vgl. Littger92, S. 1

[78] vgl. Papadimitriou/Steiglitz82, S. 3, vgl. auch Parker/Rardin88 S. 2

6.3.1 Assignmentprobleme

Das Assignment- oder Zuordnungsproblem ist eines der grundlegenden Probleme der kombinatorischen Optimierung. Es wird folgendermaßen definiert:[79]

$$\min \sum_{i,j} c_{ij} x_{ij}$$

unter

$$(1) \quad \sum_{j=1,..,n} x_{ij} = 1 \qquad \text{für alle } i = 1, .., m$$

$$(2) \quad \sum_{i=1,..,m} x_{ij} \leq 1 \qquad \text{für alle } j = 1, .., n$$

$$0 \leq x_{ij} \leq 1,\ x_{ij} \in \mathbb{N}, \qquad \text{für alle } i = 1, .., n \text{ und } j = 1, .., m$$

$$c_{ij} \in \mathbb{R}^+$$

Ein typisches Beispiel ist die Zuordnung von m Personen zu n Aufgaben. $x_{ij} = 1$, wenn der Person j die Aufgabe i zugeordnet wird. c_{ij} enthält die dabei entstehenden Kosten. (1) bedeutet, daß die Aufgabe i von genau einer Person gelöst werden muß. (2) besagt, daß einer Person maximal eine Aufgabe zugewiesen werden kann. Falls m = n, kann (2) mit Gleichheit gefordert werden. Ziel ist es, die gesamten durch die Zuordnungen anfallenden Kosten zu minimieren.[80] Ein weiteres Beispiel ist die Suche nach einem gewichteten Matching in einem bipartiten gerichtetem Graph G = (N, E) = (V, U, E), mit $V \cap U = N$. $v_i \in V$ und $u_j \in U$ für i, j = 1, .., n. Dabei bedeutet $x_{ij} = 1$, die Kante $[v_i, u_j]$ ist im Matching enthalten.[81]

Ein Verfahren mit dem das Assignmentproblem in polynomialer Zeit lösbar ist, ist die von Kuhn - aufbauend auf den Arbeiten von Egerváry und König - entwickelte *Ungarische Methode*.[82] Diese Methode benötigt für einen bipartiten Graph mit 2n Knoten bzw. für die Zuordnung von n Personen zu n Aufgaben $O(n^3)$ arithmetische Operationen.[83] Für dünne Graphen wurden mit Hilfe von Fibonacci Heaps auf alternierenden Bäumen bereits Algorithmen

---

[79] vgl. Papadimitriou/Steiglitz82, S. 248, vgl auch Nemhauser/Wolsey88, S. 6, vgl. weiter Littger92, S. 118

[80] vgl Nemhauser/Wolsey88, S. 5/6, vgl. weiter Littger92, S. 118, vgl. auch Kuhn55, S. 83

[81] vgl. Papadimitriou/Steiglitz82, S. 248

[82] vgl. Kuhn55, S. 83-97

[83] vgl. Papadimitriou/Steiglitz82, S. 250, vgl. außerdem Akgül92, S. 86

mit einer Laufzeit von lediglich $O(n^2 \log n + nm)$ entwickelt.[84] Da dieses Problem folglich polynomial lösbar ist, gehört es zur Klasse P.

6.3.2 Quadratische Assignmentprobleme

Das quadratische Assignmentproblem (QAP) wurde erstmals von Koopmans und Beckmann 1957 wie folgt definiert[85]:

Gegeben sei die Menge $N = \{1,2,..,n\}$ und die reellen $n \times n$ Matrizen $A = (a_{ij})$, $B = (b_{ij})$ und $C = (c_{ij})$.

Gesucht ist die Permutation P der Menge N, welche

$$z = \sum_{i=1..n} \sum_{j=1..n} a_{ij}\, b_{p(i)p(j)} + \sum_{i=1..n} c_{ip(i)} \text{ minimiert.}$$

$P = (p(1),..p(n))$, mit $p(i) \in N$ und $p(i) \neq p(j)$ für alle $i \neq j$

Formuliert als kombinatorisches Optimierungsproblem mit $X = (x_{ij})$ als Permutationsmatrix, wobei $x_{i,p(i)} = 1$ und $x_{ij} = 0$ für $j \neq p(i)$, wird das QAP definiert als[86]:

$$\min \sum_{i=1..n} \sum_{j=1..n} \sum_{k=1..n} \sum_{l=1..n} a_{ij}\, b_{kl}\, x_{ik}\, x_{jl} + \sum_{i=1..n} \sum_{j=1..n} c_{ij}\, x_{ij}$$

unter den Nebenbedingungen:

$$\sum_{j=1..n} x_{ij} = 1, \text{ für } i = 1,..,n$$

$$\sum_{i=1..n} x_{ij} = 1, \text{ für } j = 1,..,n$$

$$x_{ij} \in \{0,1\} \text{ für alle } i \text{ und } j$$

Das QAP ist eine Verallgemeinerung des Assignment Problems, bei dem die Koeffizienten der Zielfunktion z_{11}, .., z_{nn} nicht nur von der Zuordnung (i, j) abhängig sind, sondern von

[84] vgl. Akgül92, S. 85

[85] vgl. Koopmans/Beckmann57, S. 55, vgl. weiter Burkard/Karisch/Rendl91, S. 115 , vgl. weiterhin Pardalos/Rendl/Wolkowicz94, S. 1

[86] vgl. Pardalos/Rendl/Wolkowicz94, S. 2, vgl. auch Burkard/Karisch/Rendl91, S. 115 und vgl. Domschke/Drexl84, S. 138

Paaren von Zuordnungen abhängen.[87] Die Zielfunktion kann mit Hilfe der Kostenfunktion $z_{ijkl} := a_{ij}\, b_{kl} + c_{ij}$ auch folgendermaßen formuliert werden:

$$\min \sum_{i,j,k,l=1..n} z_{ijkl}\, x_{ij}\, x_{kl}$$

In der Literatur sind zahlreiche Beispiele aus der Praxis aufgeführt, die als QAP formulierbar sind. Typisch sind folgende Beispiele:

- Innerbetriebliche Standortplanung: Gesucht ist die Zuordnung von Organisationseinheiten (OEs) einer Firma zu möglichen Standorten, welche die Kosten für sämtliche benötigte Kommunikationen minimiert. Kommunikationen sind hierbei Aktionen die zwei OEs gemeinsam betreffen, wie z.B. Transport von Waren zwischen zwei Maschinen oder Telefonieren zwischen zwei Geschäftsstellen. Die gesamten Kosten für Kommunikationen zwischen zwei OEs sind abhängig von der Distanz zwischen den Standorten und der Häufigkeit der Kommunikation zwischen den OEs.[88]

- Plazierung und Verdrahtung von Modulen auf eine Platine: Gesucht ist die Anordnung einer bestimmten Anzahl von Modulen auf einer Platine, bei der die gesamte Länge des zur Verbindung der Module benötigten Drahtes minimal ist.[89]

- Campus Planung: Auf einem neuen Universitätsgelände sollen die Gebäude so angeordnet werden, daß die gesamte Länge der Strecke, die benötigt wird um jedes Gebäude zu erreichen, minimal ist.[90]

Das quadratische Assignmentproblem gehört zu den am schwersten zu lösenden Problemen, da es, wie 1976 von Sahni und Gonzalez bewiesen wurde, in der Klasse NPC liegt. Hierbei gehört es außerdem zu den Problemen, für die auch das Problem des Findens eines ε-approximierenden Algorithmus in NPC liegt.[91] Einige als NP-vollständig bekannte Probleme,

---

[87] vgl. Littger92, S. 48

[88] vgl. Koopmans/Beckmann57, S. 53ff., vgl. weiter Littger92, S. 48, und vgl. Domschke/Drexl84, S. 138

[89] vgl. Burkard84, S. 283

[90] vgl. a.a.O.

[91] vgl. Sahni/Gonzalez76, S. 562, vgl. weiter Pardalos/Rendl/Wolkowicz94, S. 12

wie das Traveling Salesman Problem, das Graph Partitionierungsproblem oder das Problem der maximalen Clique, können als QAP formuliert werden.[92]

6.3.2.1 Exakte Algorithmen

Da das QAP NP-vollständig ist, kann nur durch Verfahren der vollständigen Enumeration garantiert werden, daß die optimale Lösung gefunden wird. Im Gegensatz zur expliziten vollständigen Enumeration, bei der alle möglichen Lösungen durchsucht werden, erfassen implizite Verfahren nur wenige Lösungen direkt, so daß sie im allgemeinen einen deutlich geringeren Aufwand erfordern.[93]

Bekannte exakte Lösungsverfahren[94] benutzen dynamische Programmierung[95], Schnittebenenverfahren[96] sowie Branch-and-Bound Verfahren[97]. Die Varianten der verwendeten Branch-and-Bound Verfahren lassen sich, nach den jeweils betrachteten Zuordnungen, in einzelne Zuordnungen, paarweise Zuordnung, paarweisen Ausschluß von Zuordnungen und relative Zuordnung unterscheiden. Hierbei sind auf einzelnen Zuordnungen basierende Branch-and-Bound Algorithmen am effizientesten.[98]

Eine Möglichkeit das QAP näherungsweise zu lösen, ist die Verwendung von Branch-and-Bound Algorithmen mit schärferen unteren Grenzen. Diese sollten hierbei möglichst ohne großen Aufwand ermittelbar sein. Hierzu gehören insbesondere die Gilmore-Lawler Grenzen, die auf Eigenwerten basierenden Grenzen und die auf Umformulierungen beruhenden Grenzen. Dabei sind die auf Eigenwerten basierenden Grenzen zwar am besten geeignet, aber auch am aufwendigsten zu ermitteln.[99]

---

[92] vgl. Pardalos/Rendl/Wolkowicz94, S. 12

[93] vgl. Littger92, S. 109

[94] vgl. Pardalos/Rendl/Wolkowicz94, S. 18 sowie Domschke/Drexl84, S. 146/147

[95] vgl. Christofides/Benavent89, S. 760-768

[96] vgl. Bazaraa/Sherali82, S. 991-1003

[97] vgl. Roucairol87, S. 211-225

[98] vgl. Pardalos/Rendl/Wolkowicz94, S. 19

[99] vgl. a.a.O.

Gemeinsam haben sämtliche bisher bekannte exakte Verfahren, daß aufgrund der Komplexität des QAP nur für Probleme bis zu einer maximalen Inputgröße von $n = 30$ optimale Lösungen gefunden werden können. In den meisten Algorithmen treten bereits ab $n > 15$ Probleme auf.[100]

Exemplarisch soll im nächsten Abschnitt ein exakter Branch-and-Bound Algorithmus zur Lösung des quadratischen Assignment Problems näher vorgestellt werden.

6.3.2.1.1 Roucairols Branch-and-Bound Algorithmus

Grundlage für diesen exakten Algorithmus ist die Betrachtung der folgenden Formulierung des QAP's[101]:
Gesucht ist die Permutation p der Menge $N = \{1,2,...,n\}$), die $Z(p)$ minimiert, mit

$$Z(p) = \sum_{i=1..n} \sum_{j=1..n} f_{ij}\, d_{p(i)p(j)},$$

dabei gilt $p(i) = j$, falls Element i dem Element j zugeordnet wird.

Der von Roucairol entwickelte Algorithmus[102] berechnet basierend auf einem Reduktions-Verfahren, welches Z in einen linearen und einen reduzierten quadratischen Term spaltet, die obere und untere Grenze (Bound). Mit Hilfe der Reduktion werden die Matrizen $F' = (f'_{ij})$ und $D' = (d'_{kl})$ berechnet, für die gilt:

$$Z'(p) = \sum_{i=1..n} \sum_{j=1..n} f'_{ij}\, d'_{p(i)p(j)}, \text{ mit } f'_{ij} = f_{ij} - \alpha_i - \beta_j \text{ und } d'_{kl} = d_{kl} - \delta_k - \tau_l$$

α_i, β_j und δ_k, τ_l werden so gewählt, daß F' und D' keine negativen Einträge enthalten und jede Zeile sowie jede Spalte mindestens eine 0 beinhaltet.

Roucairol beweist,[103] daß zwischen dem Originalproblem und dem reduzierten Problem die Beziehung $[Z(p) = Z'(p) + K(p) - g]$ besteht. g ist eine positive Konstante und die Funktion $K(p)$ bezieht sich auf die Kostenmatrix $K = (k_{ik})$ eines linearen Assignment Problems:

---

[100] vgl. Pardalos/Rendl/Wolkowicz94, S. 18

[101] vgl. Roucairol87, S. 212

[102] vgl. a.a.O., S. 212-217

[103] vgl. Roucairol87, S. 213

$$g = \left(\sum_{i=1..n} \alpha_i\right)\left(\sum_{l=1..n} \tau_l\right) + \left(\sum_{k=1..n} \delta_k\right)\left(\sum_{j=1..n} \beta_j\right)$$

$$k_{ik} = \alpha_i\left(\sum_{l=1..n} d_{kl}\right) + \beta_i\left(\sum_{l=1..n} d_{lk}\right) + \delta_k\left(\sum_{j=1..n} f_{ij}\right) + \tau_k\left(\sum_{j=1..n} f_{ji}\right) - (n-1)(\alpha_i\delta_k + \beta_j\tau_l) + \alpha_i\tau_l + \delta_k\beta_j$$

Die Grenzen werden mit der Technik von Gilmore ermittelt, d.h. die Matrizen PO und B sind wie folgt definiert:

$$PO(f'_{i\cdot}, d'_{k\cdot}) = \sum_{r=1..n} f'_{ijr}\, d'_{klr} \quad \text{wobei } f'_{ij1} \leq f'_{ij2} \leq .. \leq f'_{ijr} \text{ und } d'_{kl1} \geq d'_{kl2} \geq .. \geq d'_{klr}$$

$$B = PO + K$$

Durch Lösen eines linearen Assignment Problems mit B als Kosten-Matrix erhält man die Permutation p^B, mit deren Hilfe die Grenzen berechnet werden können:

Untere Grenze: $\underline{Z} = B(p^B) - g$

Obere Grenze: $\overline{Z} = Z(p^B)$

Für das Branch-Verfahren sei S_0 die Wurzel des in Abbildung 23 dargestellten Baumes. Die zu S_0 gehörende Matrix B (B^0) liefert die untere Grenze. P^{B^0} sei die Permutation, welche $B^0(p)$ minimiert. Für i = 1, .., n seien S_i die Mengen, welche i zu a_i zuordnen und $\overline{S_i}$ die Mengen, welche diese Zuordnung verbieten. Die Teilmengen T_1, .., T_{n+1} beinhalten:

$T_1 = \overline{S_1}$, $\quad T_2 = \overline{S_2} \cap S_1$, $\quad T_n = \overline{S_n} \cap S_{n-1} \cap .. \cap S_1$, $\quad T_{n+1} = S_n \cap S_{n-1} \cap .. \cap S_1$

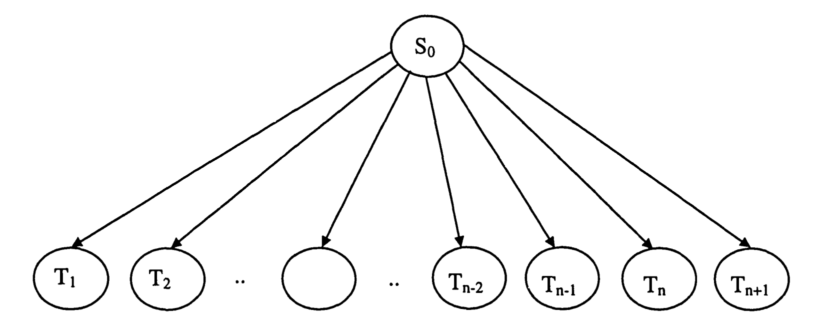


Abb. 23: Branch-and-Bound Graph[104]

[104] vgl. Roucairol87, S. 216

In jedem Knoten T_k des Baumes sind also Mengen von zulässigen paarweisen Zuordnungen und von unzulässigen paarweisen Zuordnungen enthalten. Die erste Zuordnung $p(1) = a_1$, wird mit der Heuristik „regret" bestimmt[105]:

$$\min_{j \neq a_1} b_{ij} + \min_{i \neq 1} b_{ia_i}$$

In der nächsten Stufe müssen $T_1, .., T_{n-2}$ weiter betrachtet werden, T_{n-1} und T_{n+1} entsprechen bereits je einer zulässigen Permutation und T_n enthält eine unzulässige Permutation. Bevor die nachfolgende Stufe generiert wird, werden die Knoten $T_1,..T_{n-2}$ absteigend nach den Kosten sortiert. Der Algorithmus endet, sobald eine Permutation p^B gefunden wird, die optimal ist, d.h. wenn $Z'(p^B) = PO(p^B)$.

Implementiert wurde dieser Algorithmus als paralleler Branch-and-Bound Algorithmus[106], d.h. mehrere Knoten werden jeweils parallel generiert, und Prioritätsregeln entscheiden, welche Knoten bei Eintreten von bestimmten Situationen weiter betrachtet werden. Optimale Lösungen werden zuverlässig nur bis zu einer Inputgröße von n = 12 gefunden[107], da der Aufwand exponentiell mit der Inputgröße n wächst[108]. Durch eine Weiterentwicklung dieses parallelen Algorithmus wurden für reale Probleme bereits exakte Lösungen für Inputs bis zu n = 27 gefunden.[109]

6.3.2.2 Heuristische Algorithmen

„Heuristische Verfahren dienen der Ermittlung einer zulässigen Lösung, die unter Kenntnis der Nebenbedingungen und unter Benutzung von empirischen Entscheidungskriterien ermittelt wurde. Typische empirische Entscheidungskriterien können zum Beispiel Prioritätsregeln sein. Bei heuristischen Verfahren ist in der Regel eine Aussage über die Optimierungsqualität der Lösung nur schwerlich möglich, es sei denn es gelingt, den optimalen Zielwert abzuschätzen."[110]

---

[105] vgl. Roucairol87, S. 216
[106] vgl. a.a.O., S. 218-222
[107] vgl. a.a.O., S.217
[108] vgl. a.a.O., S. 211
[109] vgl. Mautor/Roucairol93, S. 268 - 273
[110] Littger92, S. 49

Die für das QAP entwickelten heuristischen Verfahren sind grundsätzlich in folgende fünf Kategorien einteilbar bzw. aus mehreren dieser Verfahrensarten zusammengesetzt[111]:

- Konstruktionverfahren (Construction Methods): Diese Methoden erzeugen suboptimale Lösungen, indem für jeden noch nicht zugeordneten Index i ein noch nicht belegtes zulässiges j gesucht wird bis jedem $i \in I$ ein $j \in J$ zugeordnet ist. Die veröffentlichten Verfahren unterscheiden sich vorwiegend durch die Auswahlkriterien, der im jeweiligen Schritt zuzuordnenden Indizes i und j.[112]

- Beschränkte Enumerations-Verfahren (Limited Enumeration Methods): Da häufig bei enumerativen Suchverfahren relativ schnell gute, suboptimale Lösungen gefunden werden aber der Nachweis der Optimalität dieser Lösungen sehr aufwendig ist, wurden diese Verfahren entwickelt. Als Abbruchkriterium werden z.B. einfache Zeitschranken verwendet, welche die Gesamtlaufzeit des Algorithmus beschränken oder die Zeitspanne für das Auffinden von Verbesserungen begrenzen. Nach Überschreiten der Schranken wird die beste bisher gefundene Alternative als suboptimal angenommen.[113]

- Verbesserungsverfahren (Improvement Methods): Jedes Verbesserungsverfahren startet mit einer zulässigen Lösung und versucht, durch Veränderung der Zuordnungen, die Lösung zu verbessern. Somit handelt es sich um iterative Verfahren. Dazu gehören lokale Suchalgorithmen, die diverse Vertauschungsverfahren verwenden sowie Tabu-Search-Verfahren, welche insbesondere zur Überwindung lokaler Optima einsetzbar sind.[114]

- Simulated Annealing: Der Name dieser Technik stammt aus der Metallurgie von Verfahren bei denen geschmolzene Metalle so abgekühlt werden, daß eine Kristallisationsstruktur mit einem möglichst geringem Energieniveau entsteht. Simulated Annealing wird insbesondere dann eingesetzt, wenn es anderen Algorithmen nicht gelingt, lokale Optima zu verlassen. Die Überwindung lokaler Optima wird dadurch erreicht, daß zwischenzeitlich auch eine Verschlechterung der Lösung in Kauf genommen wird. Im allgemeinen handelt es sich um

[111] vgl. Pardalos/Rendl/Wolkowicz94, S. 23

[112] vgl. Domschke/Drexl84, S. 148 und vgl. Pardalos/Rendl/Wolkowicz94, S. 23

[113] vgl. Pardalos/Rendl/Wolkowicz94, S. 24

[114] vgl. a.a.O., S. 24

iterative Verbesserungen einer zulässigen Lösung, wobei in jedem Schritt eine Verbesserung mit niedrigeren Kosten gewählt oder mit einer vorgegebenen Wahrscheinlichkeit eine Verschlechterung akzeptiert wird. [115]

- Genetische Algorithmen (Genetic Algorithms): Basieren ebenfalls auf statistischen Suchverfahren. Sie enthalten Auswahlverfahren, die der natürlichen Selektion und Anpassung ähneln. Betrachtet wird eine zufällig gewählte Menge von zulässigen Lösungen, wovon mehrere Lösungen jeweils weiterentwickelt werden. Insbesondere diese parallele Betrachtung unterscheidet genetische Algorithmen von allen zuvor betrachteten heuristischen Verfahren.[116]

6.3.3 Multikriterielle Entscheidungsprobleme

Nur bei wenigen Entscheidungen, die in der Realität getroffen werden, ist die Berücksichtigung von einem Kriterium ausreichend. „Our food should taste good, smell good, look good and be nutritious. We want to have a good life, which may mean more wealth, more power, more respect and more time for ourselves, together with good health and good second generations, etc.“[117] Auch viele der Probleme aus der Praxis, auf die kombinatorische Verfahren anwendbar sind, haben eine multikriterielle Struktur, d.h. es muß nicht nur ein Ziel optimiert werden, sondern mehrere, teilweise konkurrierende Ziele sollen optimal erfüllt werden.

Falls alle betrachteten Ziele für die Lösung wichtig sind, die unterschiedlichen Prioritäten zweier Ziele durch eine Gewichtung der Ziele ausgedrückt werden können und außerdem alle Ziele voneinander unabhängig sind, ist eine Reduktion des Problems auf ein Entscheidungsproblem mit nur einer Zielsetzung möglich. In diesem Fall können die gewichteten Ziele durch Addition zu einem Ziel zusammengefaßt werden.[118] Wenn die Ziele sich gegenseitig beeinflussen, kann dagegen nicht garantiert werden, daß das Optimum O_A der addierten gewichteten Zielfunktion mit dem tatsächlichen Optimum übereinstimmt. O_A kann in diesem Fall lediglich als Näherungslösung verwendet werden.

[115] vgl. Pardalos/Rendl/Wolkowicz94, S. 25, vgl. weiterLittger92, S. 137/138

[116] vgl. Pardalos/Rendl/Wolkowicz94, S. 26, vgl weiter Littger92, S. 142

[117] Yu89, S. 663

[118] vgl. Yu89, S. 684

Ein wichtiger Aspekt von multikriteriellen Problemen ist daher die Ermittlung der Gewichte, mit deren Hilfe das Problem auf möglichst wenige Kriterien reduziert werden kann. Ein Verfahren hierzu ist das paarweise Vergleichen der Wichtigkeit von Kriterien, wobei für je zwei Kriterien relative Gewichte ermittelt werden.

6.4 Klassifikation

Die jeweilige Suche nach der optimalen Zuordnung der Elemente aus C zu den Elementen aus P läßt den Schluß zu, das sowohl das Grob- als auch das Feinplanungsproblem zu der Klasse der Assignmentprobleme gehören.

Beim Problem der Grobplanung sind die Kosten, welche sich aus Kombinationen von zwei Container-Stellplatz-Zuordnungen ergeben, für die Zielfunktion entscheidend. Da zusätzlich zu den Zuordnungsbedingungen noch weitere Bedingungen eingehalten werden müssen, handelt es sich bei diesem Problem um einen Spezialfall des quadratischen Assignmentproblems.

Ein Input des Grobplanungsproblems umfaßt für Containerschiffe der 5. Generation eine Größe von ca. $n = 4400$. Da exakte Lösungen bisher nur bis zu einer Inputgröße von maximal $n = 30$ möglich sind, ist eine Lösung mit Hilfe der bekannten exakten Verfahren nicht möglich. In Abschnitt 6.5 Lösungsstrategien wird das heuristische Verfahren vorgestellt, auf dem die Algorithmen der Systemimplementierung beruhen.

Das Feinplanungsproblem hat dagegen eine multikriterielle Struktur. Während $Z_1, .., Z_H$ unabhängig voneinander sind, da sie jeweils für eine Doppelbay ermittelt werden, ist Z_T abhängig von $Z_1,..,Z_H$. Die Ziele $Z_1,..,Z_H$ können durch die Zielfunktion $Z' = Z_1 + .. + Z_H$ zusammengefaßt werden. Da ein Containerschiff - aufgrund seiner Bauweise - in Längsrichtung wesentlich stabiler ist als in Querrichtung und somit die Einhaltung von Z' höhere Priorität hat als Minimieren von Z_T, kann eine gemeinsame Zielfunktion Z'' näherungsweise durch Addition einer geeignet gewichteten Zielfunktion Z' mit Z_T bestimmt werden:

$$Z'' = G \bullet Z' + Z_T$$

6.5 Lösungsstrategie für die Grobplanung

Der im folgenden vorgestellte Algorithmus ist ein Konstruktionsverfahren für eine zulässige Zuordnung von Containern zu Stellplätzen. Berücksichtigt werden die Bedingungen ① bis ④ sowie die Ziel- und Kostenfunktion des Grobplanungsmodells. Es wird versucht, in jedem Schleifendurchlauf möglichst viele Container Plätzen zuzuordnen, damit eine zulässige Lösung nach möglichst wenigen Durchläufen erreicht wird. Dafür werden Container-Gruppen und Stellplatz-Gruppen nach Prioritätsregeln ausgewählt und einander zugeordnet.

Die Mengen der noch zu verteilenden Container bzw. der noch zur Verfügung stehenden Stellplätze sind definiert als CV und PV. Am Anfang gelten: CV = C und PV = P, wobei ohne Beschränkung der Allgemeinheit angenommen wird, daß die Anzahl der Elemente von CV und PV übereinstimmt und n beträgt.

$$CV = \{ c \in C \,/\, \sum_{p \in P} X(c,p) = 0 \} \qquad PV = \{ p \in P \,/\, \sum_{c \in C} X(c,p) = 0 \}$$

Der Algorithmus enthält folgende elementare Schritte:

Solange (CV $\neq \emptyset$) wiederhole

- O Container-Gruppe auswählen
- O Stellplatz-Gruppe auswählen
- O Zuordnen

Zuerst wird eine Container-Gruppe ausgewählt, darauf folgt die Auswahl von zulässigen Stellplätzen. Das Zuordnen im letzten Schritt des Algorithmus beinhaltet die Aktualisierung der Mengen CV und PV. In den folgenden Abschnitten wird näher auf die einzelnen Schritte des Algorithmus eingegangen, bevor in Abschnitt 6.5.5 ein Beweis der Korrektheit sowie in 6.5.6 die Untersuchung der Komplexität folgt.

6.5.1 Container-Gruppe auswählen

Eine Einteilung der Container in Gruppen erfolgt mit Hilfe der - in 5.3 definierten - Mengen CG_{111},..,CG_{MQ4}. Jedes Element einer Gruppe CG_{mqr} besitzt den gleichen Ursprungshafen u_m, den Zielhafen z_q und den Typ in Kombination mit der Größe g_r. Die Reihenfolge der Ursprungshäfen ist u_1..u_M. Für jeden Ursprungshafen werden sämtliche Zielhäfen betrachtet - in umgekehrter Folge: z_Q..z_1 -, und für jeden Zielhafen durchläuft der Algorithmus nacheinander alle Thermal-20er-, Thermal-40er-, Normal-20er- sowie Normal-40er-Container: (vgl. Abb. 24).

CG_{1Q1}, .., CG_{1Q4}, CG_{1Q-11}, .., CG_{1Q-14},.. CG_{111}, .. , CG_{114}, ..
CG_{2Q1}, .., CG_{2Q4} CG_{2Q-11}, .., CG_{2Q-14},.., CG_{211}, .. , CG_{214}, ..
CG_{MQ1}, .., CG_{MQ4} CG_{MQ-11}, .., CG_{MQ-14},.. CG_{M11}, .. , CG_{M114}

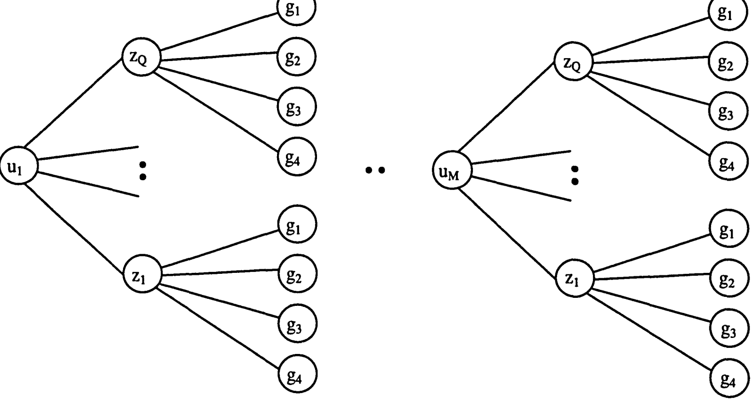


Abb. 24: Reihenfolge der Container-Gruppen

Die ausgewählte Container-Gruppe wird durch $CG = CG_{mqr}$ gespeichert. Im allgemeinen wird es nicht gelingen, während eines Durchgangs sämtliche Container aus der Gruppe CG Stellplätzen zuzuordnen. Beim jeweils nächsten Durchlauf sind dann die noch nicht zugeordneten Container der Gruppe solange zu betrachten, bis alle Container der Gruppe zugeordnet sind oder bis für die übrigen Container der Gruppe feststeht, daß sie zu Umstauern werden. Erst dann wird die nächste Container-Gruppe gemäß der Reihenfolge ausgewählt.

6.5.2 Stellplatz-Gruppen auswählen

Bei der Bildung von Stellplatz-Gruppen kann auf die gegebene Einteilung des Containerschiffes in Decks, Bays, Luken und Stacks zurückgegriffen werden. Die jeweils ausgewählte Stellplatz-Gruppe ist abhängig von den Anforderungen der zuvor ausgewählten Container-Gruppe. Um gleichzeitig möglichst viele Zuordnungen zu treffen, wird zunächst versucht, Bays zu lokalisieren, die komplett belegt werden können. Ist dies ungünstig, d.h. wenn Kosten > 0 entstehen, so werden vollständige Luken betrachtet. Können durch Berücksichtigen der Luken nicht sämtliche Container der Gruppe kostengünstig verstaut werden, so folgt eine Betrachtung der Stacks.

Die Zweiteilung in die Bereiche An Deck und Unter Deck und die, aus dem Einfluß des Lukendeckels resultierenden unterschiedlichen Stauprobleme, erfordern eine getrennte Betrachtung von Stellplatz-Gruppen der Bereiche An Deck und Unter Deck. Mit Hilfe der Eigenschaften E1', E1 - E7, welche sich an der Zielhierarchie und der Kostenfunktion des Grobplanungsmodells orientieren, sollen die Auswahlkriterien im folgenden systematisiert werden:

E1: alle Stellplätze in ..., sind im Hafen u_m verfügbar, d.h. es ist kein Container mit Zielhafen in der Ursprungsrange enthalten, und der zugehörige Bereich An Deck ist leer

E1': alle Stellplätze in ..., sind im Hafen u_m verfügbar, d.h. es ist kein Container mit Zielhafen in der Ursprungsrange enthalten, der zugehörige Bereich Unter Deck ist voll und enthält ebenfalls keinen Container mit Zielhafen in der Ursprungsrange sowie keine Container mit Zielhafen $z < z_q$

E2: die Anzahl der zulässigen Stellplätze in ... ≤ der Anzahl der zu verstauenden Container in der Gruppe

E3: ... enthält bereits Container mit Zielhafen z_q

E4: ... enthält keine Container mit Zielhafen $z \neq z_q$

E5: ... enthält noch keine Container

E6: keine der benachbarten Bays enthält Container mit Zielhafen z_q

E7: ... enthält Container mit Zielhafen $z > z_q$

!Ex: Gegenteil von Ex

Situationen, in denen Unter Deck - im Ursprungshafen u_m für Container mit Zielhafen z_q - keine Umstauer entstehen, sind folgende zwei Möglichkeiten für Bays (B1-B2), drei Möglichkeiten für Luken (L1-L3) und deren 22 für Stacks (S1-S22). Sie sind in der Reihenfolge aufgelistet, in der der Algorithmus die jeweilige Stellplatz-Gruppe auswählen soll. Die Auswahlvorschriften für den Bereich An Deck erhält man analog durch Ersetzen von E1 mit E1'.

Prioritäten:

1. - B1.: Bay mit E1 + E2 + E3 + E4
2. - L1.: Luken mit E1 + E2 + E3 + E4
3. - S1.: Stack mit E1 + E2 + E3 + E4
4. - S2.: Stack mit E1 + !E2 + E3 + E4
5. - S3.: Stack mit E1 + E2 + E3 + E7
6. - S4.: Stack mit E1 + !E2 + E3 + E7
7. - S5.: Stack mit E1 + E2 + E5 + Luke mit E3
8. - S6.: Stack mit E1 + !E2 + E5 + Luke mit E3
9. - S7.: Stack mit E1 + E2 + E5 + (Luke mit !E3 + !E5) + Bay mit E3
10. - S8.: Stack mit E1 + !E2 + E5 + (Luke mit !E3 + !E5) + Bay mit E3
11. - L2.: Luken mit E1 + E2 + E5 + Bay mit E3
12. - S9.: Stack mit E1 + E2 + E5 + (Luke mit !E3 + E5) + Bay mit E3
13. - S10.: Stack mit E1 + !E2 + E5 + (Luke mit !E3 + E5) + Bay mit E3
14. - B2.: Bay mit E1 + E2 + E5 + E6
15. - L3.: Luken mit E1 + E2 + E5 + Bay mit !E3 + E6
16. - S11.: Stack mit E1 + E2 + E5 + Luke mit !E3 + Bay mit !E3 + E6
17. - S12.: Stack mit E1 + !E2 + E5 + Luke mit !E3 + Bay mit !E3 + E6
18. - S13.: Stack mit E1 + E2 + E5 + Luke mit !E3 + Bay mit !E3 + !E6
19. - S14.: Stack mit E1 + !E2 + E5 + Luke mit !E3 + Bay mit !E3 + !E6
20. - S15.: Stack mit E1 + E2 + E7 + Luke mit E3
21. - S16.: Stack mit E1 + !E2 + E7 + Luke mit E3
22. - S17.: Stack mit E1 + E2 + E7 + Luke mit !E3 + Bay mit E3
23. - S18.: Stack mit E1 + !E2 + E7 + Luke mit! E3 + Bay mit E3
24. - S19.: Stack mit E1 + E2 + E7 + Luke mit !E3 + Bay mit !E3 + E6
25. - S20.: Stack mit E1 + !E2 + E7 + Luke mit !E3 + Bay mit !E3 + E6
26. - S21.: Stack mit E1 + E2 + E7 + Luke mit !E3 + Bay mit !E3 + !E6
27. - S22.: Stack mit E1 + !E2 + E7 + Luke mit !E3 + Bay mit !E3 + !E6

Beispiele:

B2.: Bays, für die die Anzahl der zulässigen Stellplätze kleiner ist als die Anzahl der zu verstauenden Container in der aktuellen Gruppe, in denen ferner noch kein Container enthalten und in denen jeder Platz im Ursprungshafen u_m frei ist. Keine der benachbarten Bays enthält Container mit Zielhafen z_q.

L1.: Luken, für die die Anzahl der zulässigen Stellplätze kleiner ist als die Anzahl der zu verstauenden Container in der aktuellen Gruppe, in denen jedoch bereits Container mit Zielhafen z_q enthalten sind, die keine anderen Zielhäfen enthalten und die im Ursprungshafen u_m frei sind.

S22.: Stacks, für die die Anzahl der zulässigen Stellplätze größer ist als die Anzahl der zu verstauenden Container in der aktuellen Gruppe und in denen jeder Platz im Ursprungshafen u_m frei ist. Der Stack enthält Container mit Zielhafen $z > z_q$. Weder in der Bay noch in der Luke, in der der Stack liegt, sind bereits Container mit Zielhafen z_q enthalten, und mindestens eine der benachbarten Bays enthält Container mit Zielhafen z_q.

Grundsätzlich sollen in jedem Stack die Tiers von unten nach oben gefüllt werden. Dieses Vorgehen ist jedoch nicht durchführbar für das Verstauen von Thermal-Containern in Stacks, die nicht an jedem Tier einen Stromanschluß besitzen und bei denen insbesondere der erste Tier mit Stromanschluß nicht der unterste freie Tier ist. Wird der Container dennoch dem Tier zugeordnet, bleibt darunter mindestens ein Platz frei, es entsteht folglich ein „Loch“. Um diese „Löcher“ später wieder zu beseitigen, kann eine Funktion *Löcherfüllen* definiert werden. Diese Funktion versucht zulässige Container in die Löcher zu stauen. Ist dies unmöglich, wird der Thermal-Container wieder von dem Platz entfernt und in die Umstauermenge U eingefügt.

6.5.3 Verteilen der Umstauer

Mögliche Stellplätze für Umstauer sind in diese vier Gruppen unterteilbar:

U1.: Stacks, die erst in späteren Ursprungshäfen völlig frei werden.

U2.: Stacks, in denen bereits Container mit früheren Zielhäfen enthalten sind.

U3.: Stacks über Bereichen, die erst in späteren Ursprungshäfen frei werden.

U4.: Stacks über Bereichen, in denen schon Container mit früheren Zielhäfen enthalten sind.

U1 und U3 müssen in der aktuellen Ursprungs-Range umgestaut werden, während U2 und U4 erst in der Ziel-Range erneut zu verstauen sind.

Grundsätzlich sollten U1 und U2 vor U3 und U4 ausgewählt werden, da über einen nicht vollen Bereich keine Container gestaut werden dürfen und ein Container, der über diesen Bereich als Umstauer gestellt wird, ebenso als Umstauer zur Füllung des unteren Bereichs beitragen kann. Ob U1 oder U2 bzw. U3 oder U4 zu bevorzugen sind, kann objektiv nur nach Analyse von sämtlichen Auswirkungen auf spätere Staupläne entschieden werden. Dieses weiterführende Stauplanungsproblem, die *Minimierung der Umstauer beim Verteilen von Umstauern,* wird in der vorliegenden Arbeit nicht näher analysiert.

6.5.4 Algorithmus

```
1. m = 1
2. q = Q
3. r = 1
4.WHILE (CV ≠ ∅)
      5. CG = CG_mqr
      6.WHILE (CG ≠ ∅)
            7. IF (r < 3)
                  8. Plaetzeauswählen
                  9. IF (Plaetze gefunden)
                        10. zuordnen (CG, CV und PV aktualisieren)
                  11. ELSE
                        12.U += CG und CG = ∅ und CV aktualisieren
                  13. END IF
            14. ELSE
                  15. IF (Löcher enthalten)
                        16. Löcherfüllen
                  17. END IF
                  18. Plaetzeauswählen
                  19. IF (Plaetze gefunden)
                        20. zuordnen (CG, CV und PV aktualisieren)
                  21. ELSE
                        22. U += CG und CG = ∅ und CV aktualisieren
                  23. END IF
            24. END IF
      25. END WHILE
      26. IF (r < 4)
            27. r++
      28. ELSE IF (q > 1)
            29. q--
      30. ELSE IF (m < M)
            31. IF (U ≠ ∅)
                  32. Verteilen der Umstauer
            33. END IF
            34. m++
      35.END IF
36. END WHILE
```

6.5.5 Aktualisieren

Aktualisierungen der Mengen CG, CV und PV sind bei jeder Zuordnung von Containern zu Stellplätzen vorzunehmen, also in Programmschritt 10., 20. sowie innerhalb von 16. *Löcher-füllen* und 32. *Verteilen der Umstauer.* Die verteilten Container werden aus CG und CV entfernt, ebenso die verteilten Plätze aus PV. Gelingt es nicht, zulässige Plätze zu finden, so werden in den Schritten 12. und 22. die Container ebenfalls aus CG und CV entfernt, aber in die Umstauer-Menge U zwischengespeichert, damit sie in Schritt 32. *Verteilen der Umstauer* erneut berücksichtigt werden können. Zusätzlich muß die Menge der verfügbaren Plätze in jedem neuen Ursprungshafen m um die freiwerdenden Plätze F_m erweitert werden.

6.5.6 Korrektheit

Abbruchbedingung:

- Nachdem eine Container-Gruppe CG_{mqr} behandelt worden ist, enthält sie keine Container mehr, da sämtliche verstaute und nicht verstaubaren Container in die Gruppe U eingefügt und aus CG entfernt wurden
- CV ist nach der Betrachtung der letzten Container-Gruppe CG_{M14} leer, da alle verstauten und nicht verstauten Container jeder Gruppe aus CV entfernt wurden.

⇒ Nach dem Betrachten der letzten Container-Gruppe, endet der Algorithmus.

Umstauer-Behauptungen:

1. Kein Container, der mit Hilfe der Prioritätsregeln verstaut wurde, ist ein Umstauer.
2. Jeder Container, der nicht mit Hilfe der Prioritätsregeln verstaut werden konnte, ist ein Umstauer.

Beweis zu 1.:

- In jedem Stack muß beim Beladen mit Standard-Containern die Reihenfolge der Tiers von unten nach oben eingehalten werden.
- Beim Beladen mit Thermal-Containern können Löcher entstehen; diese werden aber bevor die Prioritätenliste für Standard-Container durchsucht wird, wenn möglich, mit Containern gefüllt und andernfalls durch Entfernen des Thermal-Containers beseitigt.

- Prioritäten 1. bis 4. füllen die Bereiche, in denen bisher nur Container mit dem aktuellen Zielhafen enthalten sind.
- Prioritäten 5. und 6. füllen Stacks, in denen zusätzlich zu Containern mit aktuellem Zielhafen auch Container mit späteren Zielhäfen enthalten sind. Selbst wenn einer der Container mit späterem Zielhafen ein Umstauer ist, entstehen durch Stauen von Containern mit dem aktuellen Zielhafen keine neuen Umstauer.
- Prioritäten 7. bis 19. füllen bisher leere Bereiche mit Containern.
- Prioritäten 20. bis 27. füllen Stacks, in denen bisher nur Container mit späteren Zielhäfen als der zu verstauende Zielhafen, enthalten sind.
- zusätzlich garantiert E1, daß im zugehörigen Bereich An Deck kein Container enthalten ist und E1' verhindert, daß ein Bereich An Deck gefüllt wird, der Unter Deck nicht voll ist oder in dem Unter Deck Container enthalten sind, deren Zielhäfen vor dem zu verstauenden Zielhafen liegen.

⇒ Behauptung 1.

Beweis zu 2.:

- Durch die Auswahl von Plätzen, die Kombinationen mit !E1 entsprechen, entstehen immer Umstauer, da in diesem Fall entweder auf Container, die in der aktuellen Ursprungsrange entladen werden sollen, Container mit Zielhafen in der Zielrange gestaut werden oder Container in einen Bereich gestaut werden, über dem ein nicht leerer Lukendeckel liegt.
- Bei Kombinationen mit !E1' entstehen zusätzlich Umstauer, wenn Container auf einen Lukendeckel gestaut werden, unter dem früher zu entladende Container enthalten sind.
- Varianten mit !E4 + !E7 (schließt !E5 ein) führen ebenfalls zu Umstauern, da auf bereits verstaute Container mit Zielhafen z_z Container mit späteren Zielhäfen gestellt werden; dabei ist es unerheblich, ob zusätzlich E2, E3 oder E6 gelten.
- Es existieren keine weiteren Kombinationsmöglichkeiten, die von den Prioritäten 1. bis 27. abweichen.

⇒ folgt Behauptung 2.

Die Umstauer-Behauptungen schließen aber nicht aus, daß durch Variieren der Prioritätenliste, z.B. durch stärkere Differenzierung, eine günstigere Zuordnung erzeugt werden könnte.

Zielfunktions-Behauptungen:

3. Die Prioritäten fördern die Zielhafen-Gruppierung pro Bay und pro Luke.
4. Die Prioritäten fördern die Einhaltung eines Mindestabstandes von 2 TEU für das Verstauen von Containern mit gleichem Zielhafen in unterschiedliche Bays.

Beweis zu 3.:

- Oberste Priorität besitzen die Kombinationen, bei denen ein Bereich, der bereits Container mit dem aktuellen Zielhafen enthält, durch gleichartige Container gefüllt wird (1. - 6.). Dadurch wird die Erreichung des Zieles *Zielhafen-Gruppierung maximieren* unterstützt.
- Die Bereiche, die noch keine Container mit dem aktuellen Zielhafen enthalten und in einer Bay bzw. einer Luke liegen, in der der aktuelle Zielhafen bereits vorhanden ist, werden im Vergleich zu entsprechenden Bereichen, die in einer Bay bzw. Luke liegen, in der der Zielhafen nicht enthalten ist, bevorzugt behandelt (7. - 13. und 20. - 23.).

Beweis zu 4.:

- Bereiche, die in einer Bay liegen, in der insgesamt keine Container mit dem aktuellen Zielhafen enthalten sind, werden dann gegenüber gleichartigen Bereichen bevorzugt, wenn die in Bug- und Heck-Richtung benachbarten Bays ebenfalls keine Container mit dem aktuellen Zielhafen beinhalten (14. - 17. und 24. - 25.).

Positiv auf die Stabilität des Schiffes wirkt das Bestreben, möglichst vollständige Bays mit Containern zu füllen. Die Schiffsstatik kann verbessert werden, indem zusätzlich zur Auswahlvorschrift ein Startpunkt des Suchvorganges in bisher weniger beladenen Bereichen definiert oder der mögliche Staubereich eingeschränkt wird, um ungünstige Stabilitäts- oder Trimmwerte auszugleichen. Befindet sich das Schiff beispielsweise in gekrängter Lage nach links, so sollten bevorzugt die Luken auf der rechten Seite durchsucht werden. Ist z.B. der Bug schwerer beladen als das Heck, sollten die Bays im hinteren Bereich bevorzugt berücksichtigt werden.

6.5.7 Komplexität

Die Anzahl der zu verstauenden Container sowie die Anzahl der Stellplätze beträgt laut Annahme n. Da jede Container-Gruppe nur einmal zwischen den Schritten 4. und 36. aufgerufen wird, und selbst bei einer sehr großen Anzahl von Ursprungs- und Zielhäfen es maximal n nicht leere Container-Gruppen geben kann, wird die WHILE-Schleife 4.-36. maximal n mal durchlaufen. Innerhalb einer Container-Gruppe kann es im WORST CASE erforderlich sein, für jeden Container einzeln nach Plätzen zu suchen. Da eine Container-Gruppe maximal n Container enthält, wird also auch die WHILE-Schleife 6.-25. maximal n mal durchlaufen.

```
1.m = 1
2. q = Q
3. r = 1
4.WHILE (CV ≠ ∅)                                                   | max. n mal:
    5. CG = CG_mqr
    6.WHILE (CG ≠ ∅)                                               | max. n mal:
        7. IF (r < 3)
            8. Plaetzeauswählen  ------------------------------->  | max. O(n)
            9. IF (Plaetze gefunden)                               | durchsuchen
                10. zuordnen (CG, CV und PV aktualisieren)
            11. ELSE
                12.U += CG und CG = ∅ und CV aktualisieren
            13. END IF
        14. ELSE
            15. IF (Löcher enthalten)
                16. Löcherfüllen
            17. END IF
            18. Plaetzeauswählen  ------------------------------>  | max. O(n)
            19. IF (Plaetze gefunden)                              | durchsuchen
                20. zuordnen (CG, CV und PV aktualisieren)
            21. ELSE
                22. U += CG und CG = ∅ und CV aktualisieren
            23. END IF
        24. END IF
    25. END WHILE                                                  | = O(n²)
    26. IF (r < 4)
        27. r++
    28. ELSE IF (q > 1)
        29. q--
    30. ELSE IF (m < M)
        31. IF (U ≠ ∅)                                             | max. O(n²)
            32. Verteilen der Umstauer  ------------------------>  | Vergleiche
        33. END IF
        34. m++
    35.END IF
36. END WHILE                                                      | = O(n³)
```

Plätzeauswählen kann maximal O(n) Vergleiche erfordern, wenn jeder Stellplatz einzeln darauf überprüft wird, ob er eine der Prioritätsstufen für die ausgewählten Container erfüllt. Das Verteilen der Umstauer benötigt maximal

(Anzahl der Umstauer) • (Anzahl der noch freien Plätze) < $O(n^2)$ Vergleiche. Eine abschließende Übersicht über den Algorithmus und die Komplexität der wichtigsten Schritte kann aus der obigen Auflistung entnommen werden.

⇒ Der Algorithmus für die Stauplanung hat eine Gesamtkomplexität von $O(n^3)$.

6.6 Vergleich mit dem Grobplanungsansatz von Shields

Im Gegensatz zu früheren Planungsansätzen[119], die nicht in eine Grob- und Feinplanung differenziert sind, wurde der Ansatz von Shields ausschließlich für die Grobplanung entwickelt. Er beinhaltet ein heuristisches Verfahren, welches die Beladungsplanung für einen Hafen u unter Einbeziehung einer bestimmten Anzahl von Folgeplänen erstellt.

Der Algorithmus enthält folgende 14 Schritte[120]:

1. Zufällige Erzeugung von Zielhierarchien
2. Bildung von Gruppen mit Containern gleichen Zielhafens, gleicher Länge und gleichen Typs
3. Auswahl einer Zielhierarchie
4. Auswahl einer Containergruppe - beginnend bei jenen mit höchstem und endend bei jenen mit niedrigstem Zielhafenindex
5. Feststellung aller für die Containergruppe zulässigen Stellplätze
6. Auswahl der ersten bzw. nächsten Zielsetzung aus der Zielhierarchie
7. Verwerfen von zulässigen Stellplätzen, die die ausgewählte Zielsetzung verletzen
8. Liegen alle verbleibenden zulässigen Stellplätze in einer Doppelbay

   ja: 9 nein: 13

[119] vgl. Schott89, S. 124-133 vgl. weiter Pape/Bohm/Rieger79, S. 23-47

[120] vgl. Schott89, S. 134

9. Zuordnung der Containergruppe zu den verbleibenden zulässigen Stellplätzen der Doppelbay
10. Sind alle Containergruppen ausgewählt
    ja: 11 nein: 3
11. Bewertung des erzeugten Grobplanes mit Hilfe eines Strafpunktesystems
12. Sind alle Zielhierarchien ausgewählt
    ja: Ende nein: 3
13. Sind alle Zielsetzungen ausgewählt
    ja: 14 nein: 6
14. Zufällige Zuordnung der Containergruppe zu den Stellplätzen
    weiter mit 10

Im Gegensatz zu der in 6.5 vorgestellten Lösungsstrategie, wird im Ansatz von Shields[121] nicht von einer fest stehenden Zielhierarchie ausgegangen, sondern mehrere Zielhierarchien werden gebildet. Für jede Zielhierarchie wird ein Stauplan erstellt und durch ein Strafpunktsystem bewertet. Die Bewertung orientiert sich dabei an der Anzahl der pro Container verletzten Ziele. Aufbauend auf den drei Stauplänen mit der niedrigsten Strafpunktzahl berechnet der Algorithmus wiederum in jedem folgenden Ursprungshafen für jede Zielhierarchie einen Stauplan. Der Stauplan mit den geringsten kumulierten Strafpunkten im letzten Ursprungshafen ist schließlich die ermittelte Lösung.

Die Lösungsstrategie in 6.5 beruht auf der in Kapitel 3 erarbeiteten Zielhierarchie, d.h. Ziele sind in der Reihenfolge 1. Kapazitätsauslastung maximieren, 2. Anzahl der Umstauer minimieren, 3. Zielhafengruppierung pro Bay und 4. pro Luke maximieren und 5. Einhalten von 2 TEU Mindestabstand beim Stauen von Containern eines Zielhafens in verschiedene Bays einzuhalten. Da sich die Bewertung von Container-Stellplatz-Zuordnungen durch die Kostenfunktion in der Grobplanung an der Zielhierarchie orientiert, kann ein Variieren dieser Zielhierarchie im Grobplanungsmodell folglich nicht zu einem verbesserten Wert der Zielfunktion führen. Allerdings könnte die Lösungsstrategie um eine Heuristik für das Problem *Umstauer-Verteilen* in einem, an Shields orientierten mehrstufigen Algorithmus, mit Variieren der Umstauer-Prioritäten $U_1,..,U_4$, erweitert werden.

---

[121] vgl. Shields84, S. 375-377

7. Datenbank

In diesem Kapitel wird die Datenbasis für die Systementwicklung erläutert. Die Datenbank „staudat.mdb“ wurde mit dem relationalen, d.h. auf mengenorientierten Operationen basierenden Datenbanksystem MS Access 2.0 erstellt.[122] Aufbauend auf dem, in Abschnitt 7.1 Abbildung 26 vorgestellten Entity-Relationship-Modell für die Stauplanung, enthält Abschnitt 7.2 sämtliche Tabellendefinitionen der Datenbank, deren Beziehungen in Abschnitt 7.3 näher erläutert werden.

7.1 Entity-Relationship-Modell

Entities[123] sind strukturierte, in dem betrachteten System relevante Datenobjekte, zwischen denen *Relationships*[124] durch logische Verknüpfung Beziehungen herstellen können. Im Modell werden Entities durch Rechtecke und Relationships durch Rauten dargestellt. Die Kardinalitäten der Beziehungen werden in den Abbildungen 25 und 26 durch die Schlageter-Stucky-Notation gekennzeichnet. Am Beispiel in Abbildung 25 soll die Bedeutung der Symbole verdeutlicht werden:

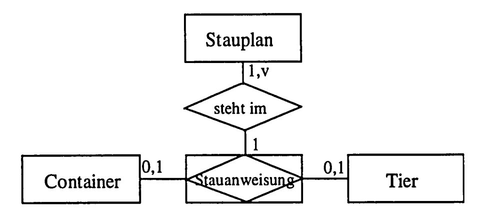


Abb. 25: Entity-Relationship Beispiel

Container, *Tier* und *Stauplan* sind Entities, während *Stauanweisung* gleichzeitig Entity und Relationship ist, *steht im* ist ein Relationship. Die Kardinalitäten bedeuten:

- Durch die *Stauanweisung* besteht zwischen einem *Container* und einem *Tier* eine Beziehung, allerdings muß kein *Container* mit einem *Tier* und kein *Tier* mit einem *Container* durch die *Stauanweisung* verknüpft sein.
- In einem *Stauplan stehen* mindestens eine maximal v *Stauanweisungen* und eine *Stauanweisung steht in* genau einem *Stauplan.*

[122] vgl. Pape et al.96, S. 7ff.

[123] vgl. a.a.O., S. 18

[124] vgl. a.a.O., S. 19

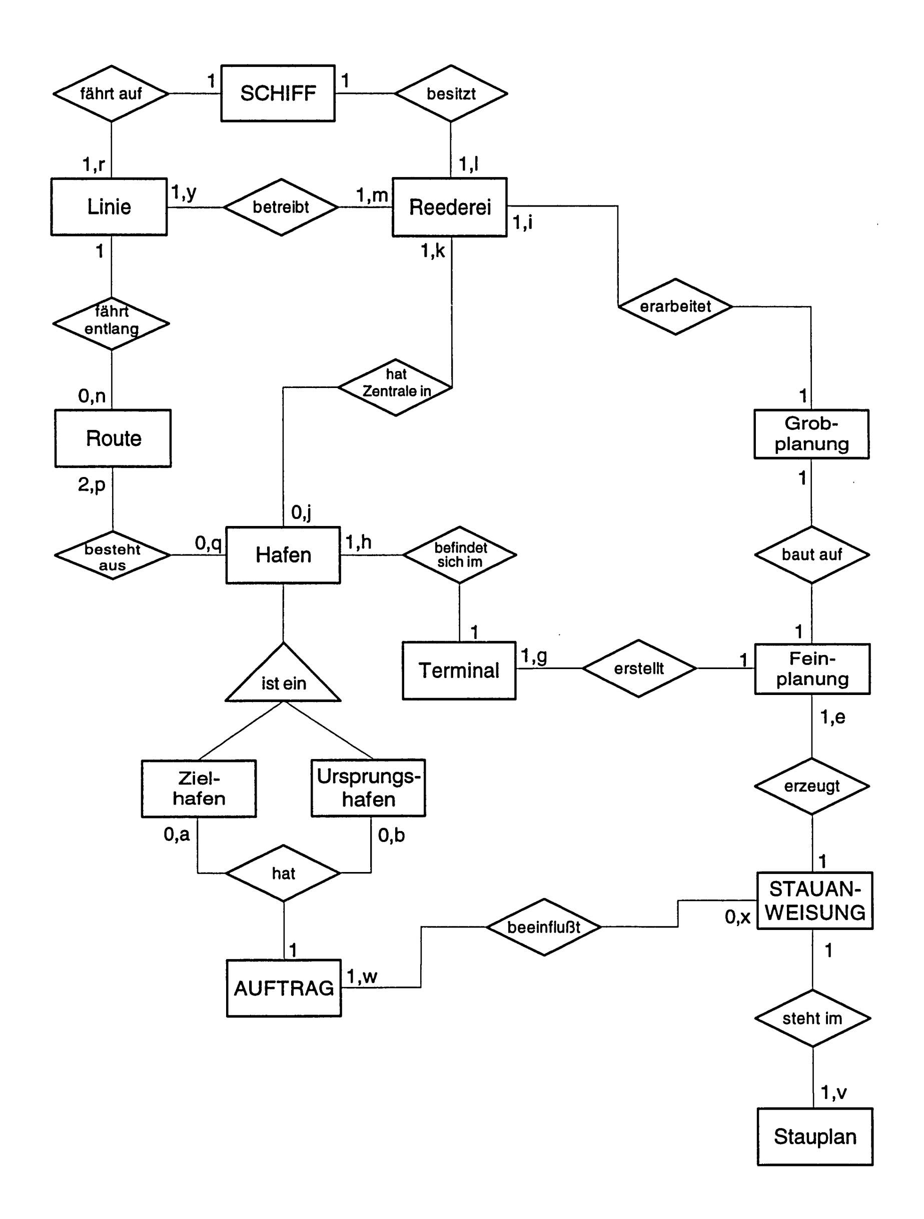


Abb. 26-1: Entity-Relationship-Model Stauplanung

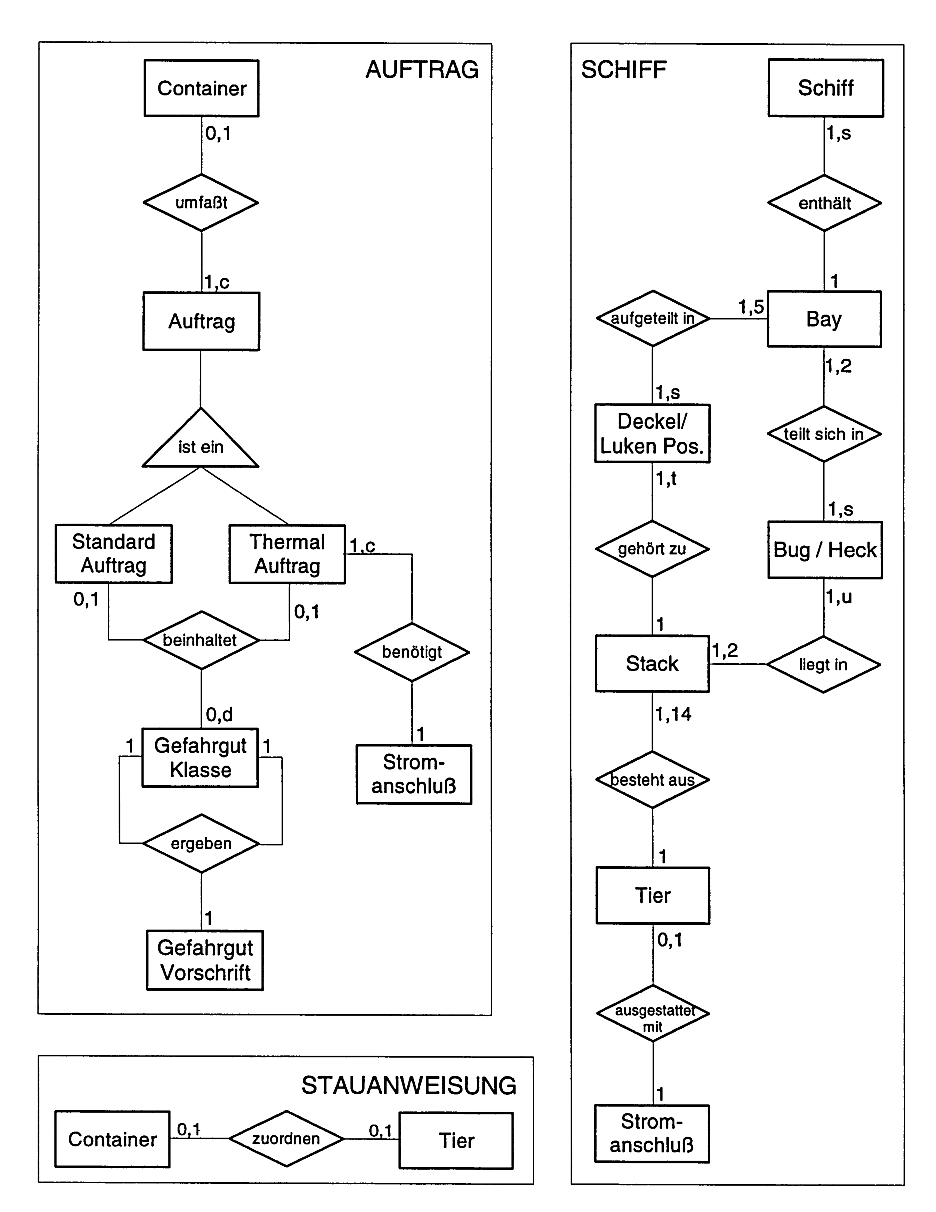


Abb. 26-2: Entity-Relationship-Model Stauplanung

7.2 Datenbank-Tabellen

Aus dem Entity-Relationship-Modell wurden mittels Normalisierung[125] die folgenden dreizehn Datenbank-Tabellen erstellt. Die Tabellen 12 bis 24 sind zusammengesetzt aus dem Namen der Tabelle in der Datenbank, dem *Primärschlüssel* und den Eigenschaften jedes Datensatzes. Jedes Element eines Datensatzes wird durch den Feldnamen, den Datentyp, eventuell einer Gültigkeitsregel und einem Standardwert sowie einer Beschreibung der Bedeutung für das System dargestellt.

Ein Primärschlüssel besteht aus einem oder mehreren Feldern deren Werte jeden Datensatz in einer Tabelle eindeutig kennzeichnen.[126] Der Feldname bezeichnet einen Eintrag in der Datenbank und ist die Überschrift in der Datenansicht. Der Datentyp kennzeichnet die Art der Daten, welche das Feld aufnehmen kann, z.B. bedeutet Text[x] das Feld kann eine Zeichenkette der Länge x aufnehmen kann. Weitere verwendete Datentypen sind Byte für Zahlen zwischen 0 und 255, Integer und Long Integer für ganze Zahlen bis $\approx \pm$ 32767 bzw. $\approx \pm$ 2E9 und Singel für reelle Zahlen, sowie JA/NEIN für boolsche Aussagen. Zusätzlich können die verwendbaren Daten durch eine Gültigkeitsregel weiter eingeschränkt sowie durch einen Standardwert bei Eingabe eines neuen Datensatzes automatisch gesetzt werden.

7.2.1 Routendaten

Der Abschnitt Routendaten faßt sämtliche Daten, die mit der von einem Schiff gefahrenen Route und den einem Container zugeordneten Häfen zusammenhängen. Dazu gehören die Tabelle *Linie*, welche den Namen einer Linie und ein Kürzel - Name in Kurzform - enthält. Tabelle *Hafen* beinhaltet den Namen eines Hafens, die Kurzform des Namens für einen schnellen Zugriff und die Range sowie das Land in dem der Hafen liegt. Die Tabelle *Route* enthält das Kürzel der zugeordneten Linie, das Kürzel eines Hafens sowie die Rangfolge in der ein Hafen angelaufen wird und Informationen darüber ob in dem Hafen geladen und/oder gelöscht wird.

---

[125] vgl. Pape et al.96, S. 12ff.

[126] vgl. a.a.O., S. 9

Linie: Primärschlüssel: LID

Feldname	Datentyp	Gültigkeitsregel	Standardwert	Beschreibung
LID	Text[5]			Linien-Identifikations-Code
LName	Text[50]			vollständiger Name der Linie

Tabelle 12: Linie

Route: Primärschlüssel: LID, Rang

Feldname	Datentyp	Gültigkeitsregel	Standardwert	Beschreibung
LID	Text[5]			Linien-Identifikations-Code
Rang	Byte			Rang in der Anlaufreihenfolge
HID	Text[5]			Hafen-Identifikations-Code
Loeschen	JA/NEIN		JA	Wird in dem Hafen gelöscht?
Laden	JA/NEIN		JA	Wird in dem Hafen geladen?

Tabelle 13: Route

Hafen: Primärschlüssel: HID

Feldname	Datentyp	Gültigkeitsregel	Standardwert	Beschreibung
HID	Text[5]			Hafen-Identifikations-Code
Hafen	Text[30]			Name des Hafens
Range	Text[7]	in (West, Ost, Europa)	Europa	Name der Range, in der der Hafen liegt
Land	Text[30]			Land in dem der Hafen liegt

Tabelle 14: Hafen

7.2.2 Auftragsdaten

Auftragsdaten umfassen die Kundenaufträge über zu transportierende Container mit den dazugehörenden Angaben zu Trennvorschriften für Gefahrgüter. Ein *Auftrag* setzt sich aus einer Menge von Containern gleicher Größe und gleichen Typs, die von einem gemeinsamen Ursprungshafen zu einem Zielhafen transportiert werden sollen, zusammen. Außerdem stimmen die Informationen über den Namen des Auftraggebers und den Inhalt für alle Container eines Auftrags überein.

Auftrag: Primärschlüssel: AID

Feldname	Datentyp	Gültigkeits-regel	Standardwert	Beschreibung
AID	Text[20]			Auftrags-Identifikations-Nummer
Anzahl	Byte		1	Anzahl der gleichartigen Container eines Auftrags
Uhafen	Text[5]			Kürzel des Ursprungshafens
Zhafen	Text[5]			Kürzel des Zielhafens
Art	Text[8]	in (Normal, Thermal)	Normal	Container-Art
Groesse	Byte	= 20 oder = 40	20	Container-Groesse
IMDG	Singel	≥ 0 und <10	0	Gefahrgutklasse
Fracht	Text[50]			Bezeichnung der zu transportieren-den Waren
Name	Text[50]			Name des Kunden
Datum	Datum, kurz		Jetzt	Datum des Auftragseinganges

Tabelle 15: Auftrag

Ein Datensatz der Tabelle *Gefahrgut* setzt sich aus zwei Klassen (GKlasse, KKlasse) und der sich für diese Kombination ergebenden Trennvorschrift zusammen. Ein Containerdatensatz beinhaltet einen Namen, ein Kürzel, die Bezeichnung des Auftrages, zu dem der Container gehört, und das Gewicht des Containers. Zusätzlich besteht die Möglichkeit, Angaben für Übergrößen-Container und offene Container zu speichern.

Gefahrgut: Primärschlüssel: GKlasse, KKlasse

Feldname	Datentyp	Gültig-keitsregel	Standardwert	Beschreibung
GKlasse	Singel			Gefahrgut-Klasse
KKlasse	Singel			kombinierte Gefahrgut-Klasse
TVorschrift	Byte	≥0 und <5	0	Trennungsvorschrift

Tabelle 16: Gefahrgut

Container:	Primärschlüssel: CID			
Feldname	**Datentyp**	**Gültig-keitsregel**	**Standardwert**	**Beschreibung**
CID	Text[12]			Container-Identifikations-Nummer
AID	Text[20]			Auftrags-Identifikations-Nummer
CName	Text[30]		Container	Vollständige Containerbezeichnung
Gewicht	Singel	≥0 und <30,5	0	Gewicht des Containers
Ueberlang	Integer		1	Faktor, um den der Container die Normgröße in der Länge überragt
Ueberbreit	Integer		1	Faktor, um den der Container die Normgröße in der Breite überragt
Ueberhoch	Integer		1	Faktor, um den der Container die Normgröße in der Höhe überragt
Offen	JA/NEIN		NEIN	Ist der Container offen?

Tabelle 17: Container

7.2.3 Schiffsdaten

Zu den Schiffsdaten gehören alle Daten über den Aufbau und die speziellen Eigenschaften eines Containerschiffes. Sie werden in die Tabellen *Schiff*, *Bay*, *DLPosition*, *Stack* und *Tier* aufgeteilt. Tabelle *Schiff* enthält Angaben zum Namen und Bezeichnungscode des Containerschiffes, Informationen über die gefahrene Route sowie Kennwerte für die Kapazität, die Position der Brücke und die Stabilität. Um zusätzlich das Schiff in die Stellplatzgruppen An Deck/Unter Deck, Bays, Luken und Stacks einzuteilen und jeden Stellplatz einzeln identifizieren zu können, enthalten die entsprechenden Tabellen jeweils Kapazitätsangaben und genaue Ortsangaben sowie Informationen über die Art der von der Stellplatzgruppe aufnehmbaren Container.

Schiff: Primärschlüssel: SID

Feldname	Datentyp	Gültigkeits-regel	Standardwert	Beschreibung
SID	Text[5]			Schiffs-Identifikations-Code
SName	Text[30]			vollständiger Name des Schiffs
LID	Text[5]			Linien-Identifikations-Code
MTEU	Integer		0	Maximale TEU Kapazität
M20	Integer		0	Maximale 20er Kapazität
M40	Integer		0	Maximale 40er Kapazität
MStrom	Integer		0	Maximale Thermal Kapazität
MGG	Long Integer		0	Maximale Gewichts-Kapazität
Trimm	Singel			Trimm-Grenzwert
Hebel	Singel			Hebel-Grenzwert
MZ0	Singel			Megazentrische Anfangshöhe
BBug	Integer			Letzte Bay vor der Brücke
BHeck	Integer			Erste Bay nach der Brücke
Reeder	Text[50]		Hapag-Lloyd	Name der Reederei

Tabelle 18: Schiff

Bay: Primärschlüssel: BID, SID, Deck

Feldname	Datentyp	Gültigkeitsregel	Standardwert	Beschreibung
BID	Byte			Bay-Identifikations-Nummer
SID	Text[5]			Schiffs-Identifikations-Code
Deck	Text[12]	in (An Deck, Unter Deck)	An Deck	Bereich, in dem die Bay liegt
BTyp	Text[7]	in (B40, BS20, BD20, B4020, BG4020)	BG4020	Bay-Typ
MBTEU	Byte		0	Maximale TEU Kapazität
MBStrom	Byte		0	Maximale Thermal Kapazität

Tabelle 19: Bay

DLPosition:	Primärschlüssel: STID, BID, SID			
Feldname	Datentyp	Gültigkeitsregel	Standardwert	Beschreibung
STID	Byte			Stack-Identifikations-Nummer
BID	Byte			Bay-Identifikations-Nummer
SID	Text[5]			Schiffs-Identifikations-Code
Pos1	Text[7]	in (L-Rand, Links, Mitte, Rechts, R-Rand)	Mitte	Position des Stacks
Pos2	Text[7]	in (NULL, L-Rand, Links, Mitte, Rechts, R-Rand)	NULL	2. Position, falls der Stack von zwei Deckeln beeinflußt ist (nur für spätere Ergänzung des Programmes)

Tabelle 20: DLPosition

Stack:	Primärschlüssel: STID, BID, SID, Bereich			
Feldname	Datentyp	Gültigkeitsregel	Standardwert	Beschreibung
STID	Byte			Stack-Identifikations-Nummer
BID	Byte			Bay-Identifikations-Nummer
SID	Text[5]			Schiffs-Identifikations-Code
Bereich	Text[6]	in (Bug, Heck)	Bug	Bereich, in dem der Stack liegt
STyp	Text[6]	in (S40, S20, S4020)	S4020	Stack-Typ
MT	Byte		0	Maximale Anzahl der Tiers
MSStrom	Byte		0	Maximale Thermal Kapazität
MSG	Integer		0	Maximales Stack-Gewicht

Tabelle 21: Stack

Tier:	Primärschlüssel: TID, STID, BID, SID, Bereich			
Feldname	Datentyp	Gültigkeits-regel	Standardwert	Beschreibung
TID	Byte			Tier-Identifikations-Nummer
STID	Byte			Stack-Identifikations-Nummer
BID	Byte			Bay-Identifikations-Nummer
SID	Text[5]			Schiffs-Identifikations-Code
Bereich	Text[6]	in (Bug, Heck)	Bug	Bereich, in dem der Stack liegt
Strom	JA/NEIN		NEIN	Ist ein Stromanschluß vorhanden?

Tabelle 22: Tier

7.2.4 Stauplandaten

In den Stauplandaten sind schließlich alle wichtigen Informationen über Zuordnungen von Containern zu Stellplätzen enthalten. Konkrete Angaben über diese Zuordnungen enthält die Tabelle *Stauanweisung*, während die Tabelle *Stauplan* übergeordnete Informationen wie Name des Schiffs, Name des Stauhafens, Datum und Typ des Stauplans zusammenfaßt.

Stauplan:	Primärschlüssel: SPID			
Feldname	Datentyp	Gültig-keitsregel	Standardwert	Beschreibung
SPID	Text[5]			Stauplan-Identifikations-Code
SID	Text[5]			Schiffs-Identifikations-Code
HID	Text[5]			Hafen-Identifikations-Code
Datum	Datum, kurz		Heute	Tag, für den der Stauplan gilt; wird vom Benutzer eingegeben
Typ	Text[5]	in (Grob, Fein)	Grob	Stauplan-Typ: Grobplan oder Feinplan

Tabelle 23: Stauplan

Stauanweisung:	Primärschlüssel: SPID, TID, STID, BID, Bereich			
Feldname	Datentyp	Gültigkeitsregel	Standardwert	Beschreibung
SPID	Text [5]			Stauplan-Identifikations-Code
TID	Byte			Tier-Identifikations-Nummer
STID	Byte			Stack-Identifikations-Nummer
Bereich	Text[6]	in (Bug, Heck)	Bug	Bereich, in dem der Stack liegt
BID	Byte			Bay-Identifikations-Nummer
CID	Text [12]			Container-Identifikations-Nummer
Umstauer	JA/NEIN		NEIN	Muß der Container später umgestaut werden?

Tabelle 24: Stauanweisung

7.3 Beziehungen

Abbildung 27 ermöglicht einen Überblick über die in der Datenbank „staudat.mdb" festgelegten Beziehungen zwischen den Tabellen. Für die Definition einer Beziehung mit *referenzieller Integrität*[127] wird vorausgesetzt, daß eine Tabelle als Mastertabelle und die andere als Detailtabelle interpretierbar ist, so daß der Primärschlüssel der Mastertabelle mit Attributen der Detailtabelle in Beziehung gesetzt werden kann. Immer wenn der Aufbau der zu einer Beziehung verknüpften Tabellen dies zuläßt, wurde die Beziehung mit *referenzieller Integrität* definiert (in der Abbildung gekennzeichnet durch eine durchgängige statt einer gestrichelten Linie).

Vorteile einer Verknüpfung mit referenzieller Integrität sind:

- In die Detailtabelle darf kein Datensatz eingefügt werden, für den in der Mastertabelle kein entsprechender Datensatz existiert.
- Werte in Mastertabellen, für die entsprechende Werte in Detailtabellen existieren, dürfen weder verändert noch gelöscht werden.

[127] vgl. Pape et al.96, S. 9

Da bei jeder Änderung der Daten in einer mit Beziehungen verknüpften Tabelle die Zulässigkeit geprüft wird, ist der benötigte Zeitaufwand für eine Änderung abhängig von der Anzahl der Beziehungen. Aus diesem Grund wurde darauf verzichtet, jede mögliche Beziehung zu definieren.

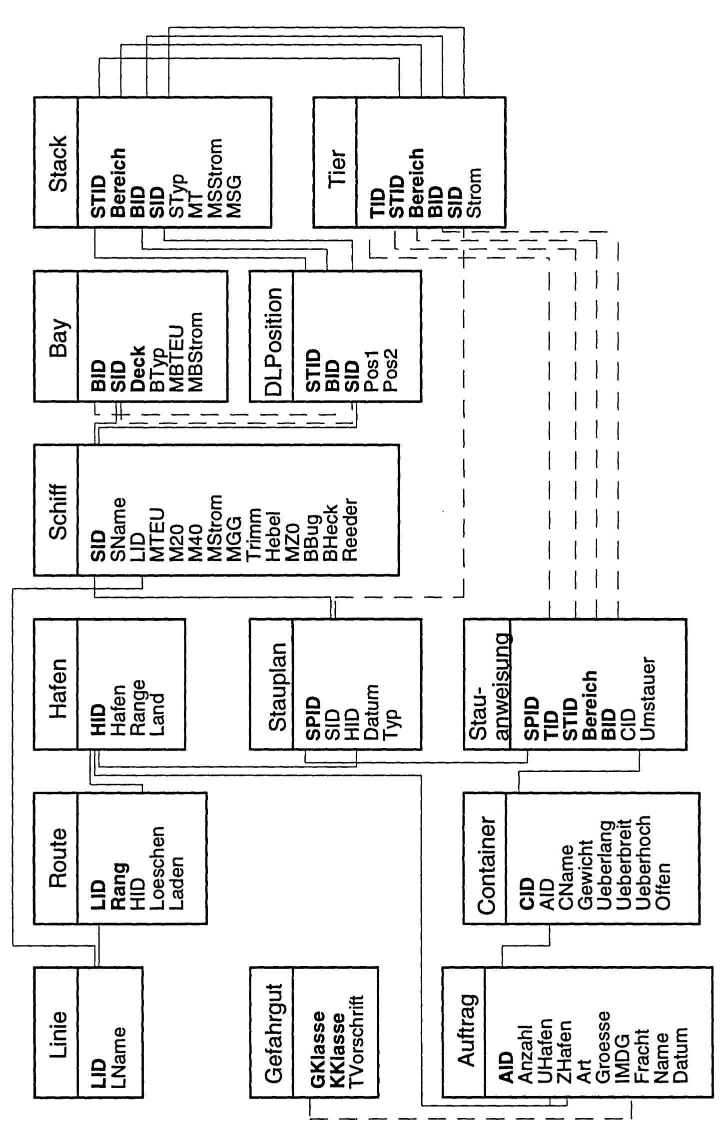


Abb. 27: Datenbank-Beziehungen

8 Implementierung

In diesem Kapitel wird die Umsetzung der in Abschnitt 6.5 entwickelten Lösungsstrategie in ein lauffähiges Programm dokumentiert. Zur Vereinfachung wird dabei auf die Berücksichtigung von Thermal-Containern innerhalb der Algorithmen für die Zuordnungen von Containern zu Stellplätzen verzichtet. Um eine problemlose Erweiterung des Programmes zu garantieren, werden Thermal-Container jedoch in die Definition der Klassen einbezogen.

8.1 Objektmodell

Zum besseren Verständnis des in Abbildung 30 dargestellten Objektmodells werden zunächst wichtige Begriffe definiert und die verwendeten Symbole erläutert.

Ein *Objekt* ist eine Abstraktion eines Elementes des betrachteten Problems, welches wichtige Informationen oder Funktionen des Problems enthält. Eine *Klasse* faßt ein oder mehrere Objekte mit gleichartigen *Attributen* und *Funktionen* zusammen.[128] Ein Attribut enthält Informationen über das Objekt, wobei jedes Objekt der Klasse die gleichen Attribute mit unterschiedlichen Inhalten besitzt.[129] Funktionen werden einerseits zur Initialisierung bzw. Veränderung von Attributen und andererseits zur Kommunikation mit anderen Objekten. benötigt[130]

Im Objektmodell kennzeichnet ein abgerundetes Rechteck eine Klasse. Ist dieses Rechteck umgeben von einem weiteren abgerundeten Rechteck, so existieren Objekte der Klasse. Das obere Drittel enthält den Namen der Klasse, das mittlere Drittel die Attribute, während im unteren Drittel die Funktionen aufgeführt sind. Vergleiche hierzu Abbildung 28.

Funktionen senden Anweisungen von einem Objekt (dem Sender) zu einem anderen (dem Empfänger). Der Sender beauftragt hierbei den Empfänger, eine Aufgabe zu erfüllen und daraufhin das Ergebnis an den Sender zurückzugeben. Dieses wird im Objektmodell durch einen

[128] vgl. Coad/Yourdon91, S. 53

[129] vgl. a.a.O., S. 119

[130] vgl. a.a.O., S. 145

Pfeil gekennzeichnet, der beim Sender beginnt und dessen Pfeilspitze auf den Empfänger zeigt.

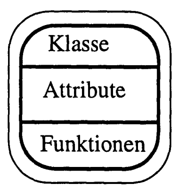


Abb. 28: Klasse & Objekt

Zwischen zwei oder mehreren Klassen können zwei Arten von Beziehungen definiert werden: Besteht eine *Generalisierungs-Spezialisierungs-Beziehung*, so stehen der spezialisierten Klasse sämtliche Attribute und Funktionen der generalisierten Klasse zur Verfügung; diese Beziehung kann als „is a"-Beziehung interpretiert werden. Im Objektmodell ist die generalisierte Klasse oberhalb der spezialisierten Klasse anzuordnen. Die Klassen werden mit einer Linie verbunden und die Beziehung durch einen Halbkreis gekennzeichnet[131]. *Teil-Ganzes-Beziehungen* bestehen, wenn ein Objekt aus mehreren Objekten anderer Klassen zusammengesetzt ist, d.h. die Attribute der Klasse sind ebenfalls Klassen; sie können auch als „has a"-Beziehungen verstanden werden.[132]

Teil-Ganzes-Beziehungen werden im Objektmodell durch ein Dreieck gekennzeichnet, welches von der Teil-Klasse zur Ganzes-Klasse zeigt. In Abbildung 29 besteht zwischen den Klassen A und B, C eine „is a"-Beziehung, und zwischen C und B ist eine „has a"-Beziehung definiert. Die angegebenen Kardinalitäten bedeuten, das ein Objekt der Klasse B Teil von mindestens einem und maximal y C-Objekten ist und Objekt C genau x B-Objekte enthält.

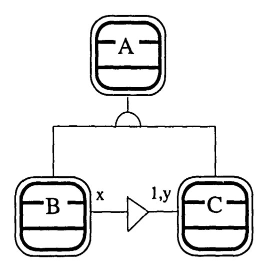


Abb. 29: Objekt-Beziehungen

[131] vgl. Coad/Yourdon91, S. 79

[132] vgl. a.a.O., S.80

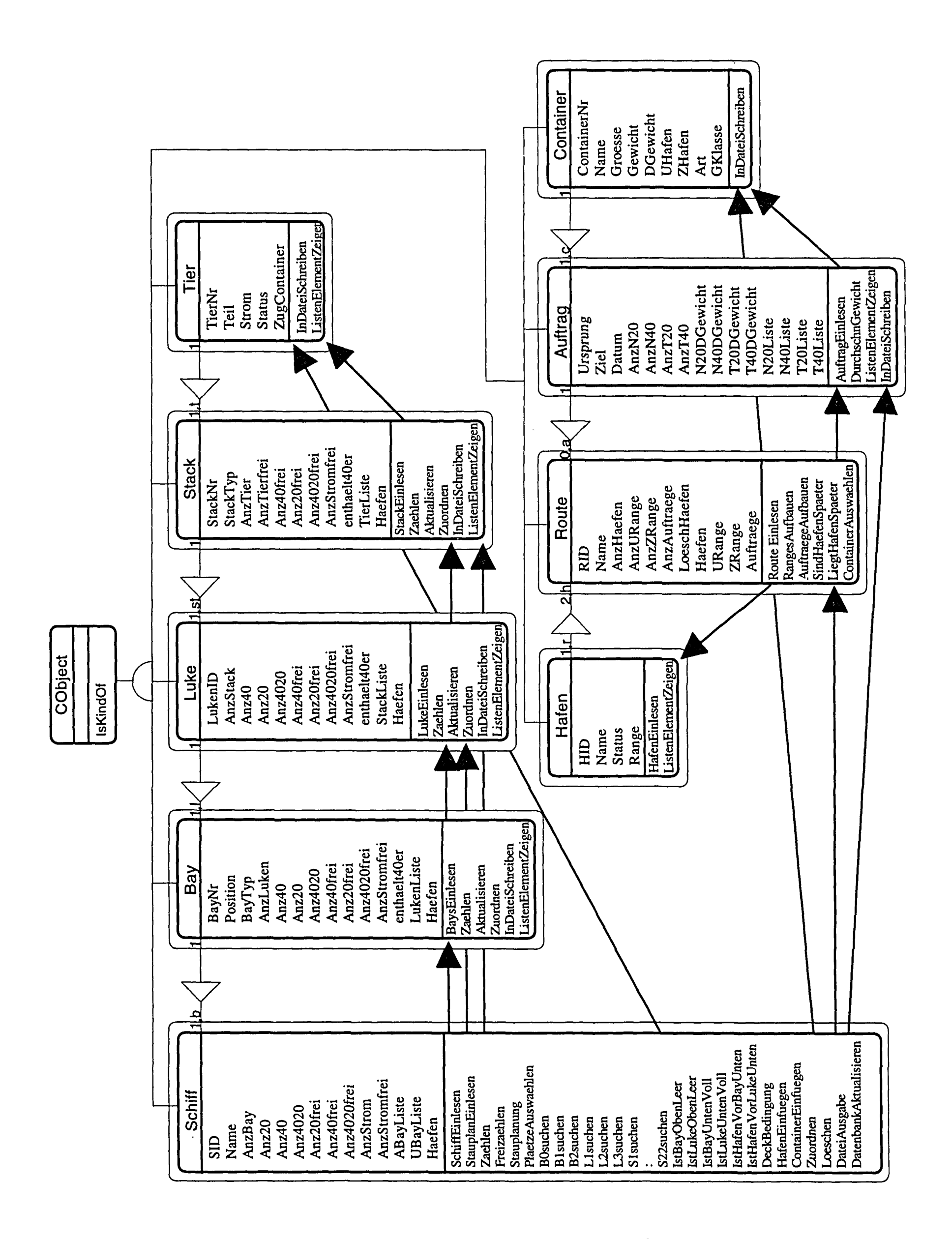


Abb. 30: Objektmodell Stauplanung

Die Klasse *CObject* ist von MS Visual C++ definiert. Sämtliche Klassen des Programms werden von CObject abgeleitet, um die Funktion *IsKindOf* benutzen zu können, welche für einen Zeiger auf ein Objekt dessen Zugehörigkeit zu einer Klasse verifiziert. Zusätzlich zu den in Abbildung 30 dargestellten Klassen wurden zum Einlesen aus der Datenbank die Klassen DSchiff, DBay, DPosition, DStack, DTier, DAuftrag, DContainer, DRoute, DLinie, DHafen, DGefahrgut, DStauplan und DStauanweisung von der MS Visual C++ Klasse *CRecordset* abgeleitet. DStauplan und DStauanweisung verfügen außerdem über eine Funktion zum Schreiben in die Datenbank.

8.2 Algorithmen

Nicht implementiert wurde die Verteilung von Thermal-Containern und die Suche nach Plätzen für Umstauer sowie deren Neuverteilung im Umstauhafen. Thermal-Container werden jedoch bei der Definition der Klassen berücksichtigt, damit das Programm problemlos erweitert werden kann. Werden Umstauer manuell in die Datenbank eingetragen, so bleiben diese solange auf den vorgesehenen Plätzen bis der Zielhafen erreicht wird. Sämtliche Plätze unter einem Umstauer können nicht an andere Container verteilt werden, wodurch die Anzahl der möglichen Stellplätze beschränkt wird.

Die verwendeten Funktionen können allgemein in *Standardfunktionen* - z.B. für Bilden von Objekten, Vergleich von Objekten und Änderungen von Attribut-Werten -, *Servicefunktionen* - u.a. zum Zählen der freien Stellplätze -, *Einlesefunktionen* - zum Einlesen der benötigten Daten aus der Datenbank -, *Stauplanungsfunktionen* und *Ausgabefunktionen* - für die Ausgabe der Ergebnisse - unterteilt werden.

8.2.1 Standardfunktionen

Standardfunktionen werden in der Regel implizit definiert, d.h. die Funktionen werden direkt innerhalb der Klassendefinition implementiert. Implizite Funktionen sind definitionsgemäß nicht im OOA-Modell aufzuführen[133] und können daher auch nicht aus Abbildung 30 entnommen werden.

[133] vgl. Coad/Yourdon91, S. 147

Folgende implizite Funktionen sind in nahezu jeder definierten Klasse enthalten:

- *Konstruktor*: Bilden eines Objektes, wobei der benötigte Speicher zur Verfügung gestellt und die Attribute initialisiert werden.
- *Destruktor*: Löscht ein Objekt und gibt dabei den belegten Speicher wieder frei.
- *Copy-Konstruktor*: Fertigt eine Kopie des Objektes an.
- *Vergleich*: Prüft ob bestimmte ausgewählte Attribute von zwei Objekten der gleichen Klasse übereinstimmen.
- *Get-Attribut*: Gibt den Inhalt eines Attributes zurück. Diese Funktion wird benötigt, wenn Objekte anderer Klassen Informationen über Attribute erfragen, da der direkte Zugriff auf die Attribute nur Objekten der Klasse erlaubt ist.
- *Set-Attribut*: Ermöglicht es, ein Attribut von einem fremden Objekt aus zu verändern. Diese Funktion ist nur für wenige Attribute in einigen Klassen definiert, da das Prinzip der Datenkapselung bei der Modellierung so strikt wie möglich eingehalten wurde.

8.2.2 Servicefunktionen

Als Servicefunktionen können alle Funktionen, die Informationen bereitstellen, definiert werden. Dazu gehören *FreiZaehlen* und *Zaehlen,* welche die jeweils aktuelle Anzahl der zur Verfügung stehenden Plätze bestimmen sowie beim Einlesen der Schiffsdaten die möglichen Plätze jeder Kategorie ermitteln. Die Funktion *BerechneDurchschnGewicht* der Klasse Auftrag berechnet für jeden Containertyp des Auftrags das durchschnittliche Gewicht. *SindHaefenSpaeter* und *LiegtHafenSpaeter* werden von der Stauplanung benötigt, um für einen Zielhafen zu prüfen, ob er vor einer angegebenen Liste von Zielhäfen von dem Schiff angelaufen wird.

8.2.3 Einlesefunktionen

Aus der Datenbank müssen sämtliche beschreibende Daten des Schiffs, Daten über Routen, Aufträge und Container sowie die Stauplandaten eingelesen werden. Den Bezug zu den Tabellen der Datenbank stellen hierbei die von CRecordset abgeleiteten Klassen her. Als Beispiel werden im folgenden der Algorithmus *SchiffEinlesen* im Pseudocode vorgestellt:

SchiffEinlesen

- Tabelle Schiff der Datenbank für das gewählte Containerschiff öffnen
- IF (existiert nicht)
    - Fehler-Meldung und Datenbank schließen
    - RETURN FALSE
- ELSE
    - Attribute setzen
    - Tabelle Bay der Datenbank für das Schiff öffnen
    - IF (existiert nicht)
        - Fehler-Meldung und Datenbank schließen
        - RETURN FALSE
    - ELSE
        - WHILE (Letzter Datensatz noch nicht erreicht)
            - IF (**BayEinlesen** UND Bay ist Unter Deck)
                - Am Ende der UBayListe einfügen
            - ELSE IF (**BayEinlesen** UND Bay ist An Deck)
                - Am Ende der ABayListe einfügen
            - END IF
            - Zum nächsten Datensatz gehen
        - END WHILE
    - END IF
- END IF
- Datenbank schließen
- **Zaehlen**
- RETURN TRUE

Die Funktionen *BayEinlesen*, *LukeEinlesen* und *StackEinlesen* sowie die Funktionen zum Einlesen der Route, der Häfen, der Aufträge, der Container und des Stauplanes gehen ähnlich vor. Durch *RangesAufbauen* werden die eingelesenen Häfen in die Gruppen Ursprungs-Range und Ziel-Range aufgeteilt. Aufbauend auf diese Einteilung liest die Funktion *Auftraege-Aufbauen* die Aufträge aus der Datenbank ein, deren Ursprungshafen in der Ursprungs-Range und deren Zielhafen in der Zielrange liegt.

Im Vergleich zu den Stauplanungsfunktionen benötigen die Einlesefunktionen relativ viel Zeit, da der von der Programmiersprache MS Visual C++ zur Verfügung gestellte Zugriff auf eine mit MS Access 2.0 erstellte Datenbank in Relation zu anderen Operationen langsam ist. Allerdings dauert der Zugriff auf eine MS Access 1.1 Datenbank mehr als 10mal länger.

8.2.4 Stauplanungsfunktionen

Da die Funktionen zur Stauplanung den Kern des Programmes bilden, werden sie hier ausführlich dokumentiert. Die direkt aus der in Abschnitt 6.5 entwickelten Lösungsstrategie abgeleitete *Stauplanung* wird im folgenden genauso wie die Funktionen *PlaetzeAuswählen, ContainerAuswählen* und *DeckBedingungen* sowie Beispielen für das Suchen nach zulässigen Plätzen vorgestellt.

Die Funktionen *Loeschen* sowie *Zuordnen* und *Aktualisieren* werden hier nicht aufgelistet. *Loeschen* geht jeweils das gesamte Schiff durch und entfernt sämtliche Container, die in dem aktuellen Ladehafen bzw. in den, vor dem Ladehafen angelaufenen Löschhäfen, entladen werden müssen. *Zuordnen* und *Aktualisieren* werden zur ständigen Aktualisierung der programminternen Stauplandaten benötigt.

Durch Aufrufen der Funktion *ContainerAuswählen* wird, falls die absteigend nach dem Zielhafen sortierte Auftragsliste für den aktuellen Hafen nicht leer ist, der erste Auftrag, d.h. die erste Container-Gruppe aus der Auftragsliste, entfernt. Auftragslisten sind für Standard 40er und 20er Container sowie als Vorbereitung für spätere Erweiterungen ebenfalls für die Thermal 40er und 20er Container definiert.

ContainerAuswaehlen

- IF (es existieren noch Auftraege)
    - 1. Auftrag aus der Liste entfernen
    - RETURN Auftrag
- ELSE RETURN NULL
- END IF

Stauplanung

- gefunden1 = gefunden2 = TRUE
- Auftrag = **ContainerAuswaehlen**
- ursprung = Auftrag-GetUrsprung
- **Loeschen** (für alle Haefen die in der Ursprungsrange bisher angelaufen wurden)
- **FreiZaehlen** (für An Deck und Unter Deck)
- WHILE (Auftrag existiert)
    - ursprung = Auftrag-GetUrsprung
    - WHILE (ein Auftrag für den Hafen ursprung exisitiert)
        - groesse = 20
        - anzahl = Auftrag-GetAnz20
        - WHILE (anzahl > 0 UND gefunden1)
            - ziel = Auftrag-GetZiel
            - Plaetze = **PlaetzeAuswaehlen**
            - IF (Plaetze == NULL)
                - gefunden1 = FALSE
            - ELSE
                - **Schiff-Zuordnen**
            - END IF
            - anzahl = Auftrag-GetAnzN20
        - END WHILE
        - **FreiZaehlen**(für Unter Deck)
        - groesse = 40
        - anzahl = Auftrag-GetAnz40
        - WHILE (anzahl > 0 UND gefunden1)
            - ziel = Auftrag-GetZiel
            - Plaetze = **PlaetzeAuswaehlen**
            - IF (Plaetze == NULL)
                - gefunden1 = FALSE
            - ELSE
                - **Schiff-Zuordnen**
            - END IF
            - anzahl = Auftrag-GetAnzN40
        - END WHILE
        - **FreiZaehlen**(für Unter Deck)
        - IF (NOT gefunden1 ODER NOT gefunden2)
            - Auftrag in ObenAuftraege-Liste einfügen
        - END IF
        - Auftrag = **ContainerAuswaehlen**
        - gefunden1 = TRUE
        - gefunden2 = TRUE
    - END WHILE
    - UntenAuftrag = Auftrag
    - IF (ObenAuftraege-Liste ist nicht leer)
        - Auftrag = 1.Auftrag aus ObenAuftraege-Liste
    - ELSE
        - Auftrag = NULL
    - END IF
    - WHILE (ein Auftrag für den Hafen ursprung exisitiert)

        - groesse = 20
        - anzahl = Auftrag-GetAnz20
        - WHILE (anzahl > 0 UND gefunden1)
            - ziel = Auftrag-GetZiel
            - Plaetze = **PlaetzeAuswaehlen**
            - IF (Plaetze == NULL)
                - gefunden1 = FALSE
            - ELSE
                - **Schiff-Zuordnen**
            - END IF
            - anzahl = Auftrag-GetAnzN20
        - END WHILE
        - **FreiZaehlen**(für An Deck)
        - groesse = 40
        - anzahl = Auftrag-GetAnz40
        - WHILE (anzahl > 0 UND gefunden1)
            - ziel = Auftrag-GetZiel
            - Plaetze = **PlaetzeAuswaehlen**
            - IF (Plaetze == NULL)
                - gefunden1 = FALSE
            - ELSE
                - **Schiff-Zuordnen**
            - END IF
            - anzahl = Auftrag-GetAnzN40
        - END WHILE
        - **FreiZaehlen**(für An Deck)
        - IF (NOT gefunden1 ODER NOT gefunden2)
            - Auftrag in Umstauer-Liste einfügen
        - END IF
        - IF (ObenAuftraege-Liste ist nicht leer)
            - Auftrag = 1.Auftrag aus ObenAuftraege-Liste
        - ELSE
            - Auftrag = NULL
        - END IF
        - gefunden1 = TRUE
        - gefunden2 = TRUE
    - END WHILE
    - Auftrag = UntenAuftrag
    - IF (Auftrag existiert)
        - **Loeschen** (für alle Haefen die in der Ursprungsrange bis zum nächsten Ladehafen angelaufen werden)
        - **FreiZaehlen** (für Unter Deck und An Deck)
    - END IF
- END WHILE

Die Namen, der durch die Funktion *PlaetzeAuswaehlen* aufgerufenen Suchfunktionen, entsprechen den in Abschnitt 6.5.2 definierten Prioritätsregeln. Da diese Funktionen alle sehr

ähnlich aufgebaut sind, wird hier jeweils nur ein Beispiel für Bay-Suchen, Luke-Suchen und Stack-Suchen vorgestellt.

PlaetzeAuswaehlen

- Bay = **B1suchen,** IF (Bay NOT NULL) RETURN Bay
- Luke = **L1suchen,** IF (Luke NOT NULL) RETURN Luke
- Stack = **S1suchen,** IF (Stack NOT NULL) RETURN Stack
- Stack = **S2suchen,** IF (Stack NOT NULL) RETURN Stack
- Stack = **S3suchen,** IF (Stack NOT NULL) RETURN Stack
- Stack = **S4suchen,** IF (Stack NOT NULL) RETURN Stack
- Stack = **S5suchen,** IF (Stack NOT NULL) RETURN Stack
- Stack = **S6suchen,** IF (Stack NOT NULL) RETURN Stack
- Luke = **L2suchen,** IF (Luke NOT NULL) RETURN Luke
- Stack = **S7suchen,** IF (Stack NOT NULL) RETURN Stack
- Stack = **S8suchen,** IF (Stack NOT NULL) RETURN Stack
- Bay = **B2suchen,** IF (Bay NOT NULL) RETURN Bay
- Luke = **L3suchen,** IF (Luke NOT NULL) RETURN Luke
- Stack = **S9suchen,** IF (Stack NOT NULL) RETURN Stack
- Stack = **S10suchen,** IF (Stack NOT NULL) RETURN Stack
- Stack = **S11suchen,** IF (Stack NOT NULL) RETURN Stack
- Stack = **S12suchen,** IF (Stack NOT NULL) RETURN Stack
- Stack = **S13suchen,** IF (Stack NOT NULL) RETURN Stack
- Stack = **S14suchen,** IF (Stack NOT NULL) RETURN Stack
- Stack = **S15suchen,** IF (Stack NOT NULL) RETURN Stack
- Stack = **S16suchen,** IF (Stack NOT NULL) RETURN Stack
- Stack = **S17suchen,** IF (Stack NOT NULL) RETURN Stack
- Stack = **S18suchen,** IF (Stack NOT NULL) RETURN Stack
- Stack = **S19suchen,** IF (Stack NOT NULL) RETURN Stack
- Stack = **S20suchen,** IF (Stack NOT NULL) RETURN Stack
- Stack = **S21suchen,** IF (Stack NOT NULL) RETURN Stack
- Stack = **S22suchen,** IF (Stack NOT NULL) RETURN Stack
- RETURN NULL

B2suchen (BayListe, zielhafen, typ, groesse, anzahl, route)

- WHILE (AktBay existiert)
  - AktBay = nächste Bay aus BayListe
  - PrevBay = Bay vor AktBay (falls AktBay 1. Bay: = AktBay)
  - NextBay = Bay nach AktBay (falls AktBay letzte Bay: = AktBay)
  - IF (AktBay ist leer UND weder PrevBay noch NextBay enthalten zielhafen)
    - IF (typ und groesse erlaubt UND FreiePlätze < anzahl
      UND **DeckBedingung** ist erfüllt)
      - RETURN AktBay
    - END IF
  - END IF
- END WHILE
- RETURN NULL

L1suchen (BayListe, zielhafen, typ, groesse, anzahl, route)

- WHILE (AktBay existiert)
  - AktBay = nächste Bay aus BayListe
  - IF (AktBay enhält zielhafen UND AktBay ist nicht voll)
    - WHILE (AktLuke existiert)
      - AktLuke = nächste Luke der Bay
      - IF (AktLuke enhält zielhafen
        UND AktLuke enthält keine anderen Zielhäfen
        UND FreiePlätze < anzahl
        UND typ und groesse sind erlaubt
        UND **DeckBedingung** ist erfüllt)
        - RETURN AktLuke
      - END IF
    - END WHILE
  - END IF
- END WHILE
- RETURN NULL

S18suchen (BayListe, zielhafen, typ, groesse, anzahl, route)

- WHILE (AktBay existiert)
  - AktBay = nächste Bay aus BayListe
  - IF (AktBay enhält zielhafen nicht UND AktBay ist nicht voll)
    - WHILE (AktLuke existiert)
      - AktLuke = nächste Luke der Bay
      - IF (AktLuke enhält andere Zielhäfen
        UND Luke ist nicht voll
        UND **DeckBedingung** ist erfüllt)
        - WHILE (AktStack existiert)
          - AktStack = nächster Stack der Luke
          - IF (AktStack enthält nur spätere Zielhäfen
            UND AktStack ist nicht voll
            UND typ und groesse sind erlaubt)
            - RETURN AktStack
          - END IF
        - END WHILE
      - END IF
    - END WHILE
  - END IF
- END WHILE
- RETURN NULL

Die Funktion *DeckBedingung* prüft für den Bereich An Deck, ob der zugehörige Bereich Unter Deck voll ist und ob ein Container An Deck, ohne zu einem Umstauer zu werden, verstaut werden kann. Für Bereiche Unter Deck wird geprüft, ob bereits ein Container in dem Bereich An Deck enthalten ist.

DeckBedingung (zielhafen)

- IF (geprüft wird für Bay Unter Deck)
    - RETURN (ist Bay An Deck leer?)
- ELSE IF (geprüft wird für Luke Unter Deck)
    - RETURN (ist Luke An Deck leer?)
- ELSE IF (geprüft wird für Bay An Deck)
    - RETURN (liegt zielhafen später, als jeder Zielhafen der Bay Unter Deck?)
- ELSE IF (geprüft wird für Luke An Deck)
    - RETURN (liegt zielhafen später, als jeder Zielhafen der Luke Unter Deck?)
- END IF
- RETURN FALSE

Gelingt es nicht, Stellplätze für die aktuelle Container-Gruppe mit Hilfe der Prioritätsregeln zu finden, so müssen die Container in eine *Umstauermenge* eingefügt werden. Dies ermöglicht dem zuständigen Stauplaner nach Beendigung des Algorithmus einen Überblick über die nicht verstauten Container, welche daraufhin manuell nach subjektiven Kriterien des Planers eingefügt werden können. Beim Loeschen des Stauplanes werden die im jeweiligen Hafen auftretende Umstauer jedoch nicht entfernt sondern bleiben bis zum Anlaufen ihres Löschhafens auf den zugewiesenen Plätzen stehen.

8.2.5 Ausgabefunktionen

Ausgabefunktionen werden benötigt, um Ergebnisse auf dem Bildschirm anzuzeigen, in eine Datei zu schreiben oder um die Datenbank zu aktualisieren. Die Funktionen *AusgabeRoute* sowie die Funktionen *ListenElementZeigen* der Klassen Bay, Luke, Stack, Tier und Hafen dienen zur Ausgabe von Informationen auf dem Bildschirm.

Für jeden Ursprungshafen werden die erstellten Staupläne und die Umstauer mittels *Datei-Ausgabe* und *InDateiSchreiben* in eine Datei geschrieben. Der Name der Datei setzt sich aus dem Hafen-Identifikations-Code und der Endung „.dat“ zusammen. Nach Beendigung des Programms können die Dateien mit einem beliebigen Editor betrachtet werden. Zusätzlich besteht die Möglichkeit, Staupläne durch die Funktion *DatenbankAktualisieren* in die Datenbank einzufügen.

8.3 Programmablauf

Zu Beginn wird der Benutzer aufgefordert aus einer Liste von Schiffen das in Frage kommende Schiff auszuwählen, woraufhin versucht wird, dieses Containerschiff einzulesen. Wurde das Schiff nicht vollständig in die Datenbank eingegeben, z.B. wenn zu einer Luke kein Stack-Datensatz existiert, so wird der Einlesevorgang abgebrochen und der Anwender erhält erneut die Möglichkeit, ein Schiff zu wählen. Nach dem vollständigen Einlesen eines Schiffes erscheint eine Anzeige mit der Anzahl der zur Verfügung stehenden Plätze.

Im nächsten Schritt wird die Route, auf der das gewählte Schiff fährt, eingelesen. Der Benutzer wählt die aktuelle Ursprungs-Range aus, worauf die Aufträge für die Ladehäfen eingelesen werden. Situationsberichte informieren über die Teilung der aktuellen Route in Ursprungs- und Zielhäfen und über die Anzahl der zu verstauenden Container, geordnet nach Container-Gruppen. Den Abschluß der Vorbereitungen bildet die Auswahl und das Einlesen des Bezugsstauplanes, d.h. des Stauplanes des letzten Hafens der vorherigen Range.

Schließlich wird für jeden Ladehafen ein Stauplan durch die vorgestellten Funktionen ermittelt und als Ergebnis in eine Datei geschrieben. Am Ende dieser Stauplandateien werden die Container ausgegeben, für die es nicht gelungen ist, zulässige Stellplätze zu finden ohne Umstauer zu erzeugen. Zusätzlich kann die Datenbank durch den Stauplan aktualisiert werden, was insbesondere für den letzten Hafen der Range, als Bezugshafen für die folgenden Range, sinnvoll ist.

9 Benutzeroberfläche

Die Gestaltung der Benutzeroberfläche orientiert sich an den Grundsätzen der ergonomischen Dialoggestaltung (nach DIN 66234, Teil 8). Ein „Dialog ist der Ablauf, bei dem der Benutzer zur Abwicklung einer Arbeitsaufgabe - in einem oder mehreren Schritten - Daten eingibt und jeweils eine Rückmeldung über die Verarbeitung dieser Daten erhält“[134].

Zu beachtende Gestaltungsgrundsätze[135] sind:

- *Aufgabenangemessenheit*: Die Dialoggestaltung entspricht der Komplexität, der Art und dem Umfang der zu verarbeitenden Informationen.
- *Selbstbeschreibungsfähigkeit*: Alle enthaltenen Elemente sollen überschaubar und weitestgehendst selbsterklärend aufgebaut sein.
- *Steuerbarkeit*: Der Benutzer kann die Geschwindigkeit des Arbeitsablaufes und die Auswahl und Reihenfolge der Arbeitsmittel selbst bestimmen sowie die Art und den Umfang der Ein- und Ausgaben beeinflussen.
- *Erwartungskonformität*: Das Dialogverhalten innerhalb des Programms ist einheitlich.
- *Fehlerrobustheit*: Erkennbar falsche Eingaben des Benutzers dürfen nicht zu Systemabbrüchen führen und müssen durch geringen Korrekturaufwand behebbar sein.

Die Benutzeroberfläche wurde mit MS Access 2.0 gestaltet. Da das Programm zur Unterstützung von Experten der Stauplanung entwickelt wurde, kann davon ausgegangen werden, daß der Anwender mit den Grundlagen der Stauplanung vertraut ist. Daher wird zugunsten der Übersichtlichkeit auf ausführliche Beschriftungen und Hilfefunktionen innerhalb des Programms verzichtet.

In den Fenstern werden folgende unterscheidbare Symbole verwendetet: Schaltflächen, Textfelder, Textlisten (List-Box), Auswahllisten (Combo-Box) und Auswahlkästchen (Check-Button). Schaltflächen können durch Anklicken mit dem Eingabegerät Maus ausgewählt werden; die verwendeten Schaltflächen sind in Abschnitt 9.3 dokumentiert. In Textfeldern kann der Benutzer Daten per Tastatur eingeben, Textlisten ermöglichen durch Anklicken der Pfeile

[134] DIN 66234, Teil 8

[135] vgl. DIN 66234, Teil 8

die Auswahl von erlaubten Werten, während Auswahllisten eine Liste mit zulässigen Werten enthalten, aus denen sich der Benutzer durch Textangabe oder Anklicken den gewünschten Wert aussuchen kann. Ein Auswahlkästchen besteht aus einem Rechteck, welches durch ein Kreuz auf 'Wahr' und ohne Kreuz auf 'Falsch' gesetzt wird.

9.1 Startfenster

Das in Abbildung 31 dargestellte Startfenster erscheint nach Aktivieren der Datenbank auf dem Bildschirm. Im Unterfenster *Datenansicht* kann der Benutzer die gespeicherten Daten der einzelnen Tabellen durch Anklicken abrufen. Hierfür stehen gemäß des Grundsatzes der Steuerbarkeit zwei unterschiedliche Ansichten zur Verfügung: zum einen die Formularansicht und zum anderen die Tabellenansicht, zwischen denen durch Verändern des Auswahlkästchens *Formular* gewechselt werden kann.

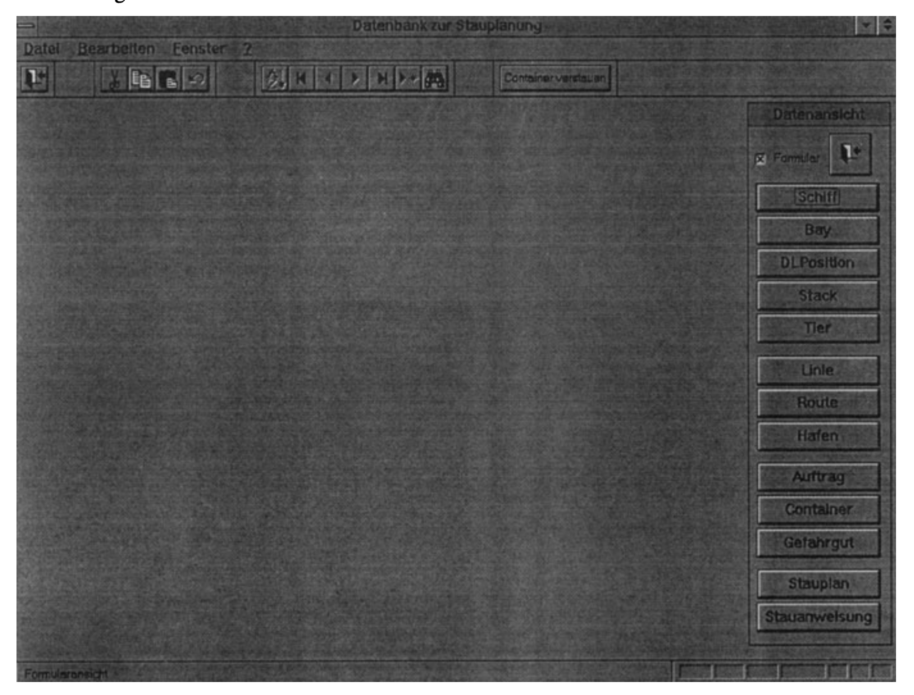


Abb. 31: Startfenster

Ist die Formularansicht gewählt, so erscheint das zu der gewählten Tabelle gehörende Formular, in dem jeweils nur ein Datensatz angezeigt wird. Dagegen erscheint in der Tabellenansicht die um Hilfsfunktionen erweiterte Datentabelle. Genauere Informationen über diese Ansichten können den Abschnitten 9.4 Formulare und 9.5 Datentabellen entnommen werden.

9.2 Hauptmenü

Entsprechend den Gestaltungsgrundsätzen, insbesondere der Erwartungskonformität, enthält das Hauptmenü nur Menüpunkte, die aus anderen Windows-Anwendungen (wie z.B. MS Word oder MS Access) bekannt sind oder zumindest einen sich selbst erklärenden Namen besitzen.

Das Hauptmenü besteht aus den Untermenüs *Datei*, *Bearbeiten*, *Fenster* und *?* (Information). Mit dem Unterpunkt *Beenden* des Menüs *Datei* kann das Programm verlassen werden. *?* beinhaltet *Info*, welches ein Informationsfenster anzeigt.

Im Menü *Bearbeiten* sind, zusätzlich zu den Windows Standard-Funktionen *Rückgängig*, *Ausschneiden*, *Kopieren*, *Einfügen*, *Löschen*, *Suchen* und *Ersetzen*, die Datenbank-Funktionen *Datensatz markieren* und *Alle Datensätze markieren* verfügbar. Das Menü *Fenster* enthält schließlich die Standard-Funktionen *Nebeneinander*, *Überlappend*, *Symbole anordnen*, sowie *Ausblenden* und *Einblenden* zum Verstecken und Anzeigen von beliebigen Fenstern.

9.3 Schaltflächen

Die Schaltflächen wurden entsprechend der Selbstbeschreibungsfähigkeit und der Erwartungskonformität so gewählt, daß der Benutzer möglichst schnell erkennen kann, welche Funktion durch Anklicken einer Schaltfläche aufgerufen wird.

Durch Aktivieren der in Abbildung 32 dargestellte Schaltfläche wird das Fenster, in dem sie sich befindet, geschlossen. Handelt es sich dabei um das Startfenster des Programms, so wird dieses beendet.



Abb. 32: Schaltfläche beenden

Die Schaltflächen zum Bearbeiten in Abbildung 33 entsprechen den Standard-Schaltflächen *Ausschneiden*, *Kopieren*, *Einfügen* und *Widerrufen* aus anderen Windows-Anwendungen.



Abb. 33: Schaltflächen Bearbeiten

Abbildung 34 enthält Schaltflächen, welche die Bearbeitung von Datensätzen unterstützen. Von links nach rechts haben sie folgende Bedeutung: *Sortieren*, *Gehe zum 1. Datensatz*, *Gehe zum vorherigen Datensatz*, *Gehe zum nächsten Datensatz*, *Gehe zum letzten Datensatz*, *Füge einen neuen Datensatz ein* und *Suche einen Datensatz*.



Abb. 34: Schaltflächen Datensätze

Aktivieren der Schaltfläche *Container verstauen* bewirkt den Aufruf des Stauplanungsprogramms. Hierbei erscheint ein Fenster, in dem der Benutzer zuerst zur Auswahl des aktuellen Containerschiffes aufgefordert wird. Daraufhin werden das gewählte Schiff sowie die von dem Schiff gefahrene Route eingelesen. Als weitere Eingaben werden nacheinander die aktuelle Ursprungs-Range und der letzte Stauplan der vorherigen Range erwartet.



Abb. 35: Schaltfläche Container verstauen

9.4 Formulare

Sämtliche in der Formularansicht angezeigten Fenster sind gemäß der Erwartungskonformität gleichartig aufgebaut: In der Kopfzeile befinden sich der Name der zugehörigen Tabelle und die Schaltfläche zum Beenden des Fensters. Darunter stehen auf der rechten Seite untereinander die Felder eines Datensatzes, und auf der linken Seite befindet sich eine Schaltfläche zum Markieren des aktuellen Datensatzes. In der Fußzeile des Fensters werden neben der Nummer des aktuellen Datensatzes und der Anzahl der bisher eingegebenen Datensätze Schaltflächen zum Bewegen zwischen den Datensätzen angezeigt. Aus den Abbildungen 36 und 37 können zwei Beispiele zu Formularansichten entnommen werden.

Der Benutzer kann sich gemäß der Steuerbarkeit mit Hilfe der Maus oder durch die Tabulator- und Pfeiltasten der Tastatur innerhalb des Fensters bewegen. Gemäß der Aufgabenangemessenheit wird die Eingabe neuer und die Bearbeitung bestehender Datensätze wenn mög-

lich durch Textlisten, Auswahllisten und Auswahlkästchen vereinfacht. Für das Speichern der Daten wird keine Schaltfläche benötigt, da jeweils automatisch nach Verlassen eines neuen oder veränderten Datensatzes gespeichert wird.

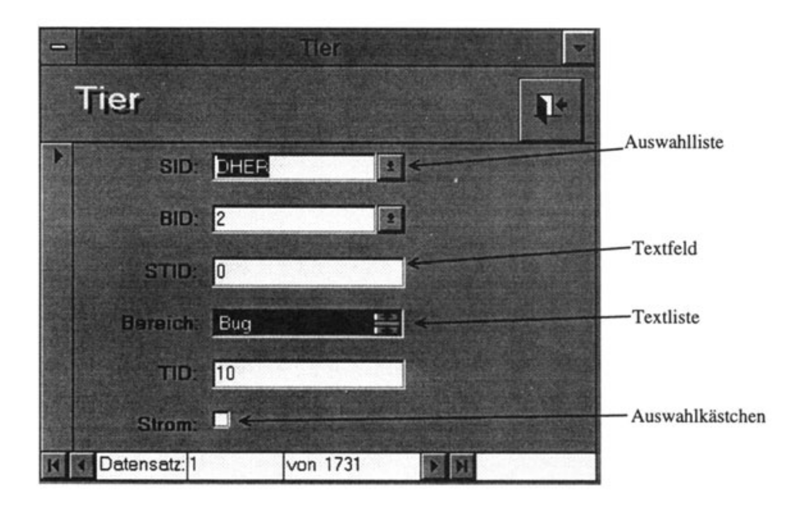


Abb. 36: Formular-Ansicht Tier

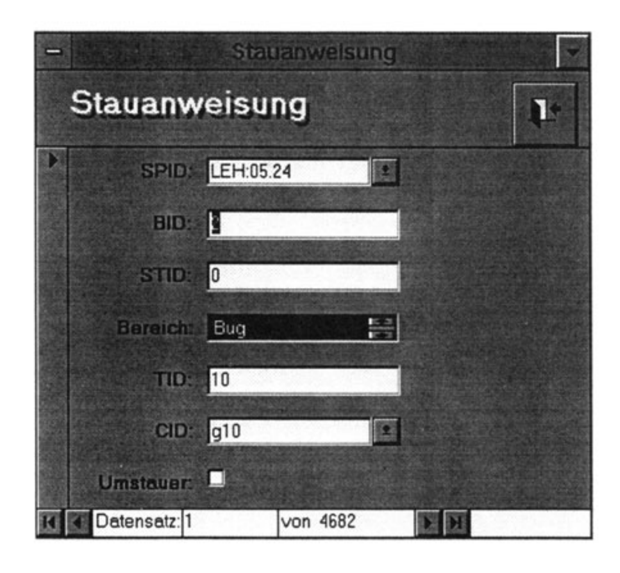


Abb. 37: Formular-Ansicht Stauanweisung

9.5 Erweiterte Datentabellen

Im Gegensatz zu Formularen zeigen erweiterte Datentabellen sämtliche Datensätze einer Tabelle an. Im Vergleich zu normalen Datentabellen, bei denen in jeder Zeile Zahlen oder Worte stehen, sind sie um Auswahlkästchen und Auswahllisten erweitert Diese Erweiterung soll dem dem Benutzer die Eingabe bzw. Änderung von Daten erleichtern. Abbildung 38 zeigt als Beispiel die erweiterte Datentabelle *Route*, welche in den Spalten *Loeschen* und *Laden* Auswahlkästchen und in den Spalten *LID* und *HID* Auswahllisten enthält.

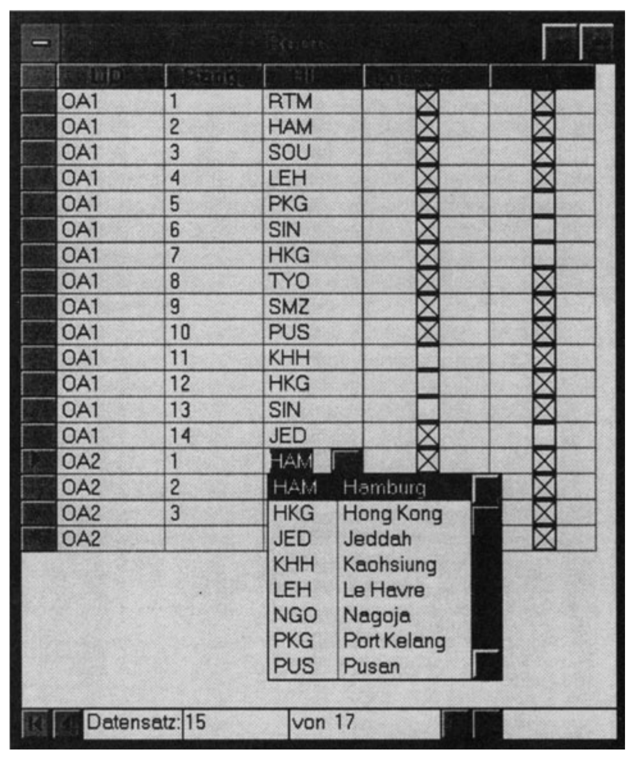


Abb. 38: Erweiterte Datentabelle

9.6 Zusammenfassung

Die gestaltete Benutzeroberfläche entspricht den Grundsätzen ergonomischer Gestaltung von Dialogsystemen gemäß der DIN-Norm 66234 Teil 8, in der ...

1. Aufgabenangemessenheit, da die Oberfläche den Benutzer in der Arbeit unterstützt, z.B. reduziert sich durch die Verwendung von Auswahllisten und Auswahlkästchen der Eingabeaufwand und die Fehleranfälligkeit.

2. Selbstbeschreibungsfähigkeit, da die Menüpunkte und Schaltflächen vorwiegend dem Windows-Standard entsprechen und nur Begriffe und Abkürzungen der Stauplanung verwendet werden.

3. Steuerbarkeit, weil der Benutzer die Art der Eingabe per Maus oder Tastatur selbst bestimmen kann sowie die Ansicht von Datensätzen als Formular oder Datentabellen nach dem Ziel seiner Arbeit auswählen kann.

4. Erwartungskonformität, da die Formulare gleichartig aufgebaut sind und die in den meisten Fenstern enthaltene Schaltfläche für *Beenden* jeweils an der gleichen Position zu finden ist.

5. Fehlerrobustheit, weil bei der Eingabe bzw. Änderung von Daten überprüft wird, ob sie den Gültigkeitsregeln der Tabelle entsprechen und bei auftretenden Fehlern eine Fehlermeldung erscheint.

10 Auswertung

Das Stauplanungsprogramm wurde mit einem Schiff getestet, welches aus mehreren vollständigen Bays der „Hoechst Express“ aufgebaut ist. Um sicher zu stellen, daß sämtliche auftretende Besonderheiten des Schiffsaufbaus berücksichtigt werden, umfaßt das eingegebene Schiff je neun Bays Unter Deck und An Deck. Hierbei sind die meisten Bays vom Typ BG4020. Ausnahmen bilden zwei BS20 Bays Unter Deck und je eine BS20 und B40 Bay An Deck (zu den Baytypen vgl. Tabelle 4 im Abschnitt 2.2.1 Aufbau). Die Stellplatzkapazität des Schiffes beträgt 1786 TEU. Die betrachtete Route ist die, von der „Hoechst Express“ gefahrene Route im Ost-Asien-Verkehr (vgl. Abschnitt 2.4). Standard 40er- und 20er-Container wurden für die Ranges Europa und Ost in einem Umfang von 1521 TEU bzw. 1630 TEU eingegeben, was einer Auslastung von ca. 85 % bzw. ca. 91 % entspricht.

Beginnend mit der Range Europa wurde, basierend auf dem leeren Schiff, zuerst je ein Stauplan für die Häfen Rotterdam, Hamburg, Southamton und Le Havre erzeugt. Beim folgenden Programmaufruf wurde auf der Grundlage des Stauplanes für Le Havre je ein Stauplan für die Häfen der Range Ost generiert. Daraufhin folgte ein Aufruf für die Range Europa basierend auf dem Stauplan für Singapur (dem letzten Hafen der Range Ost) sowie ein Aufruf für die Range Ost auf Basis des neuen Stauplanes im Hafen Le Havre. Die Daten der zu verstauenden Containern in den Datentabellen ‘Auftrag’ und ‘Container’ wurden zwar aus Vereinfachungsgründen nicht variiert, durch den geänderten Stau-Ist-Zustand ergibt sich aber jeweils eine neue Stausituation.

Während in der Range Europa sowohl beim ersten als auch beim zweiten Stauen keine Umstauer entstanden, traten in der Range Ost beim ersten Stauen 91 Umstauer und beim zweiten Stauen 66 Umstauer auf. Dies entspricht einem Anteil von 6 % bzw. 4 % des Gesamtladevolumens. Also bereitete es in der Testsituation keine Schwierigkeiten, sämtliche Container bei einer Auslastung von 85 % zu verstauen. Bei einer Auslastung von 91 % traten dagegen Umstauer auf. Weitere empirische Prüfungen müssen nachfolgenden Studien vorbehalten bleiben.

11 Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit enthält eine Analyse der Stauplanung von Containerschiffen sowie die objektorientierte Entwicklung und Implementierung eines heuristischen Verfahrens zur Erstellung von Stauplänen der Grobplanung.

Von besonderem Interesse sind die aus den Stauvorschriften und der Zielhierarchie entwickelten mathematischen Modelle für die Grob- und die Feinplanung, da, im Gegensatz zu sämtlichen bisher entwickelten Ansätzen, ein Bezug zu den bekannten diskreten Optimierungsproblemen Assignmentproblem, quadratisches Assignmentproblem und multikriterielles Entscheidungsproblem hergestellt wurde. Die vorgenommene Analyse hat gezeigt, daß die Grobplanung als quadratisches Assignmentproblem und die Feinplanung als multikriterielles lineares Assignmentproblem formulierbar sind.

Die berücksichtigte Zielhierarchie enthält als oberstes Ziel die maximale Auslastung der Stellplatzkapazität. Darauf folgen die Minimierung der Umstaueranzahl sowie weitere Verteilungsziele. Die Sicherung des Schiffes durch die Einhaltung von Gefahrgut-Trennvorschriften und von den Grenzwerten der Statik werden vernachlässigt, da die komplexen Trennvorschriften grundsätzlich einer Kontrolle durch Spezialisten bedürfen und die Betriebsstatik in der Regel durch Ballastwasser gesichert werden kann. Im Gegensatz zu den bisher entwickelten Modellen wurden in der vorliegenden Arbeit Thermal-Container einbezogen, wodurch die Praxisrelevanz entscheidend verbessert wurde.

Die definierte Datenbank sowie die entwickelte Benutzeroberfläche sind an die Erfordernisse der Praxis angepaßt. Insbesondere durch die Möglichkeit, zwischen zwei Datenansichten zu wählen, kann der Stauplaner individuell über die Vorgehensweise für zu erledigende Aufgaben, wie z.B. Eingabe neuer Routen, Containerschiffe oder Aufträge sowie der Ansicht von einzelnen Stellplätzen, entscheiden.

Da das quadratische Assignmentproblem NP-vollständig ist, kann kein exakter Algorithmus, mit in der Anzahl der zu verstauenden Container polynomialer Laufzeit, für die Grobplanung entwickelt werden. Der implementierte heuristische Stauplanungs-Algorithmus ermittelt eine Zuordnung von Containern zu Stellplätzen und die Anzahl der auftretenden Umstauer.

11.1 Ausblick

Die erörterten Aspekte zur Verteilung der Umstauer erfordern eine Fortführung durch Erweiterung des Algorithmus um entsprechende Verteilungsverfahren. Zusätzlich ist die Implementierung in sich anschließenden Arbeiten, um die im Algorithmus vorgenommene Einbeziehung von Thermal-Containern zu erweitern und durch, bereits in der Praxis eingesetzte, automatische Statikberechnungen zu ergänzen. Die Vernachlässigung der Gefahrgut-Container kann, durch eine Modellerweiterung um eine zusätzliche Variable für Gefahrgüter und um Kostenfunktionen für die einzelnen Trennvorschriften in späteren Arbeiten behoben werden. Diese Ergänzungen wurden mittels einer Definition der benötigten Attribute und Funktionen bereits vorbereitet, wie z.B. das Attribut Gefahrgutart in der Klasse Container bzw. die Funktion zur Berechnung des Durchschnittsgewichtes einer Container-Gruppe in der Klasse Auftrag.

Somit ist die vorliegende Arbeit eine entscheidende Verbesserung bisher existierender Verfahren und kann als Grundlage für die weiterführende Entwicklung eines sämtliche Einflußfaktoren der Praxis berücksichtigenden, effizienten, heuristischen Verfahrens zur Stauplanerstellung verwendet werden.

12 Literaturverzeichnis

12.1 Selbständige Bücher und Schriften

Alte/Matthiessen80 Alte, Rainer, Matthiessen, Henning: Schiffbau kurzgefaßt, Schiffahrts-Verlag Hansa, Hamburg, 1980

Böer84 Böer, Friedrich: Alles über ein Containerschiff, Koehlers Verlagsgesellschaft mbH, Herford, 1984

Coad/Yourdon91 Coad, Peter, Yourdon, Edward: Object oriented analysis, Englewood Cliffs, New Jersey, 1991

Domschke/Drexl84 Domschke, Wolfgang, Drexl, Andreas: Logistik, 3. Bd.: Standorte, R. Oldenbourg Verlag, München, 1984

Geuther90 Geuther, Ralph: Der Wettbewerb in der Containerlinienschiffahrt: Der Transportmarkt Bundesrepublik Deutschland-Fernost, Vandenhoeck & Ruprecht, 1990, Göttingen

Hapag-Lloyd93 o.V., Hapag-Lloyd AG: Schedule/Fahrplan October/November 1993, Hamburg, 1993

Hapag-Lloyd89 o.V., Hapag-Lloyd AG: Container Informationen ´89/´90, Hamburg, 1989

Hesse89 Hesse, Stephan: Einführung in die Programmiersprache MUMPS, hrsg. v. Wolfgang Kirsten, de Gruyter, Berlin, 1989

Hummel/Männel90 Hummel, Siegfried, Männel, Wolfgang, Kostenrechnung, 1. Bd.: Grundlagen, Aufbau und Anwendungn, Gabler, Wiesbaden, 1990

Kienzle91 Kienzle, Jörg: Schriftenreihe Transport und Verkehr, Heft 1: Das Container Transportsystem, Verlag Heinrich Vogel GmbH, München, 1991

Littger92 Littger, Kurt: Optimierung, Eine Einführung in rechnergestützte Methoden und Anwendungen, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 1992

Müller-Berg 94 Müller-Berg, Michael: Sicherheitsmaßnahmen und rechtliche Anforderungen im Rahmen von EDI, in: Mehr über EDI und EDIFAKT, 1994, hrsg. v. Deutsche EDI-Gesellschaft.

Müller+Blanck o.V., Müller+Blanck Software GmbH: CAPSTAN3, General Information, Norderstedt, o.J.

Müller/Krauss80 Müller, Johannes, Krauß Joseph: Handbuch für die Schiffsführung, 3. Bd.: Seemannschaft und Schiffstechnik, Teil B: Stabilität, Schiffstechnik, Sondergebiete, hrsg. v. Walter Helmers, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, 1980

Nemhauser/Wolsey88 Nemhauser, George L., Wolsey, Laurence A.: Integer and Combinatorial Optimization, John Wiley & Sons, Inc., New York, 1988

Papadimitriou/Steiglitz82 Papadimitriou, Christos H., Steiglitz Kenneth: Combinatorial Optimization: Algorithms and Complexity, Prentice Hall International, Inc., New Jersey, 1982

Pape et al.96 Pape, Uwe et al.: Datenbanken, Unterlagen zu der Vorlesung Betriebliche Systeme 1, TU-Berlin, Berlin, 1996

Pape/Bohm/Rieger79 Pape, Uwe, Bohm, Hans-Joachim, Rieger, Andreas: Ein Anwendungssystem zur Erstellung eines Stauplanes für Containerschiffe, TU-Berlin, Berlin, 1979

Parker/Rardin88 Parker, R.Gary, Rardin, Ronald L.: Discrete Optimization, Academic Press, Inc., San Diego, 1988

Schott89 Schott, Rainer: Stauplanung für Containerschiffe, Verkehrswissenschaftliche Studien 39, Vonderhack & Ruprecht, Göttingen, 1989

Schierenbeck89 Schierenbeck,Henner: Grundzüge der Betriebswirtschaftslehre, R. Oldenbourg Verlag GmbH, München, 1989

Storck91 Storck Verlag, Internationaler Code für die Beförderung gefährlicher Güter mit Seeschiffen - In amtlicher deutscher Übersetzung, Hamburg, 1991

Storck92 Storck Verlag, Stowage & Segregation Guide to IMDG-Code, Hamburg, 1992

12.2 Beiträge in Sammelwerken

Akgül92 Akgül, Mustafa: The Linear Assignment Problem, in: Akgül, Mustafa, Hamacher, Horst W., Tüfekci, Süleyman: Combinatorial Optimization New Frontiers in Theory and Practice, NATO ASI Series, Springer Verlag, Berlin Heidelberg, 1992, S. 85-122

Mautor/Roucairol93 Mautor, Thierry, Roucairol, Catherine: Difficulties of Exact Methods for solving the Quadratic Assignment Problem, 1993, in: Pardalos, Panos M., Wolkowicz, Henry: Quadratic Assignment and Related Problems, DIMACS Series in Discrete Mathematics and Theoretical Computer Science Volume 16, American Mathematical Society, 1994, S. 268-273

Pardalos/Rendl/Wolkowicz94 Pardalos, Panos M., Rendl, Franz, Wolkowicz, Henry: The Quadratic Assignment Problem: A Survey and Recent Developments, in: Pardalos, Panos M., Wolkowicz, Henry: Quadratic Assignment and Related Problems, DIMACS Series in Discrete Mathematics and Theoretical Computer Science Volume 16, American Mathematical Society, 1994, S. 1-42

Yu89 Yu, P. L.: Multicple Criteria Decision Making: Five Basic Concepts, in: Nemhauser, George L. et al.: Optimization, Handbooks in operations research and management science, Elsevier Science Publishers, North-Holland, 1989, S. 663-699

12.3 Aufsätze in Zeitschriften

Bazaraa/Sherali82 Bazaraa, Mokhtar S., Sherali, Hanif D.: On The Use of Exact and Heuristic Cutting Plane Methods for the Quadratic Assignment Problem, in: Journal of the Operational Research Society, 33. Jg., Nr. 11, 1982, S. 991-1003

Burkard/Karisch/Rendl91 Burkard, Rainer E., Karisch, S., Rendl, F.: A Quadratic Assignment Problem Library, in: European Journal of Operational Research, 55. Jg., Nr. 1, 1991, S. 115-119

Burkard84 Burkard, Rainer E.: Quadratic assignment problems, in: European Journal of Operational Research, 15. Jg., 1984, S. 283-289

Christofides/Benavent89 Christofides, Nicos, Benavent, Enrique: An Exact Algorithm For The Quadratic Assignment Problem On A Tree, in: Operations Research, 37. Jg., Nr. 5, September-Oktober 1989, S. 760-767

Koopmans/Beckmann57 Koopmans, Tjalling C., Beckmann, Martin: Assignment Problems And The Location Of Economic Activities, in: Econometrica, 25. Jg., Nr. 1, Januar 1957, S. 53-76

Kuhn55 Kuhn, H.W.: The Hungarian Method For The Assignment Problem, in: Naval Research Logistics Quart., 2. Jg., 1955, S. 83-97

Roucairol87 Roucairol, Catherine: A Parallel Branch And Bound Algorithm For The Quadratic Assignment Problem, in: Discrete Applied Mathematics, 18. Jg., 1987, S. 211-225

Sahni/Gonzalez76	Sahni, Sartaj , Gonzalez, Teofilo: P-Complete Approximation Problems, in: Journal of the Association for Computing Machinery, 23. Jg., Nr. 3, July 1976, S. 555-565
Shields84	Shields, J. J.: Containership Stowage: A Computer-Aided Preplanning System, in: Marine Technology, 21. Jg., Nr. 4, S. 370-383
Schiff & Hafen 4/95	o.V.: Containerhäfen Hongkong bleibt die Nummer eins, in: Schiff & Hafen 4/95, S. 14
Schiff & Hafen 12/94	o.V.: Bordrechner, in: Schiff & Hafen 12/94, S. 45-46

13 Anhang

13.1 Containerschiff Hoechst Express

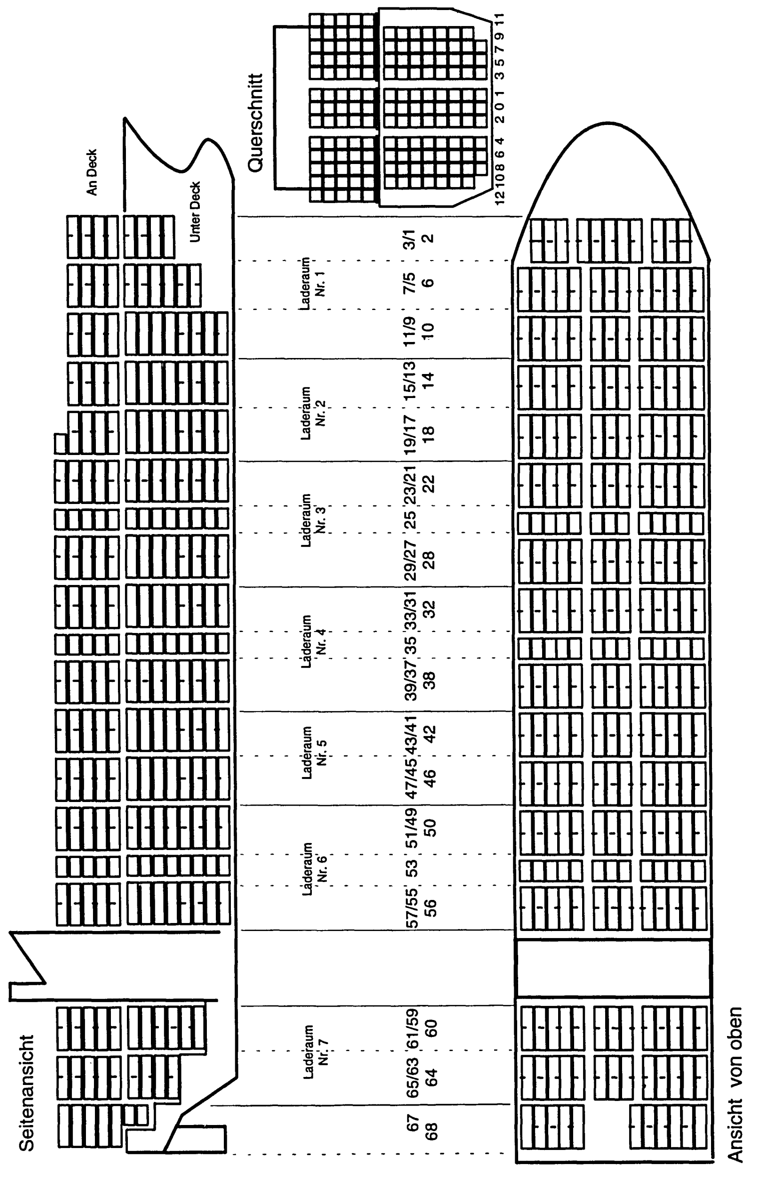


Abb. 39: Hoechst Express

13.2 Containerhäfen 1994

Rang	Hafen	Land	Range	Umschlag 1994 in TEU
1	Hongkong	Hongkong	Ost	11.265.984
2	Singapore	Singapore	Ost	10.600.000
3	Kaohsiung	Taiwan	Ost	4.899.879
4	Rotterdam	Niederlande	Europa	4.475.000
5	Pusan	Korea	Ost	3.750.000
6	Kobe	Japan	Ost	2.787.000
7	Hamburg	Deutschland	Europa	2.725.718
8	Long Beach	USA	West	2.573.827
9	Los Angeles	USA	West	2.518.618
10	Yokohama	Japan	Ost	2.320.000
11	Antwerpen	Belgien	Europa	2.208.173
12	New York	USA	West	2.000.000
13	Keelung	Taiwan	Ost	1.899.268
14	Dubai	Ver. Arab. Emirate	Ost	1.882.828
15	Tokio	Japan	Ost	1.772.000
16	Felixstowe	Großbritannien	Europa	1.746.653
17	San Juan	Puerto Rico	West	1.550.000
18	Oakland	USA	West	1.504.718
19	Bremerhaven	Deutschland	Europa	1.480.000
20	Seattle	USA	West	1.369.690

Tabelle 25: Rangliste der Containerhäfen 1994[136]

136 vgl. o.V., Schiff & Hafen 4/95, S. 14

Aus unserem Programm

Rainer Alt
Interorganisationssysteme in der Logistik
Interaktionsorientierte Gestaltung von Koordinationsinstrumenten
1997. XX, 316 Seiten, 39 Abb., 30 Tab., Broschur DM 98,-/ ÖS 715,-/ SFr 89,-
DUV Wirtschaftswissenschaft
ISBN 3-8244-0334-X
Ausgehend von der Beobachtung aus, daß in der Logistik zwar bereits seit längerem Informationssyteme eingesetzt werden, ihr Erfolg jedoch erheblich hinter den Erwartungen zurückbleibt, entwickelt dieses Buch Alternativen.

Karlheinz Mevissen
Mehrwegsysteme für Verpackungen
Probleme und Gestaltungsansätze in der Konsumgüterwirtschaft
1996. XXI, 298 Seiten, Broschur DM 98,-/ ÖS 715,-/ SFr 89,-
GABLER EDITION WISSENSCHAFT
ISBN 3-8244-6339-3
Der Autor entwickelt ein Simulationssystem, mit dem unterschiedliche Gestaltungsmöglichkeiten der Redistribution von Mehrwegverpackungen im Hinblick auf Kosten verglichen und beurteilt werden können. Das Leistungsvermögen des Simulators wird an verschiedenen Szenarioanalysen exemplarisch verdeutlicht.

Gerd Naujoks
Optimale Stauraumnutzung
Lösungsverfahren zum zweidimensionalen homogenen Packproblem
1995. XIII, 166 Seiten, Broschur DM 89,-/ ÖS 650,-/ SFr 81,-
ISBN 3-8244-6166-8
G. Naujoks erarbeitet neue und effiziente Lösungsverfahren zur Beladung von Paletten und Containern mit gleichartigen quaderförmigen Packstücken. Sie basieren auf heuristischen Verfahren und exakten kombinatorischen Algorithmen.

Alfons Niebuer
Qualitätsmanagement für Logistikunternehmen
1996. XIX, 346 Seiten, Broschur DM 118,-/ ÖS 861,-/ SFr 105,-
GABLER EDITION WISSENSCHAFT
ISBN 3-8244-6415-2
Der Autor erarbeitet differenzierte Gestaltungsansätze für das Qualitätsmanagement von Logistikunternehmen. Ausgehend von einer Darstellung der Ziele, Potentiale, Vorgehensweisen und Anwendungsvoraussetzungen diverser Qualitätsmanagementansätze generiert der Autor unterschiedliche Qualitätsmanagementprofile.